



Leibniz  
Universität  
Hannover



Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Physische Geographie  
und Landschaftsökologie



Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum  
Oberpfaffenhofen

# Analyse und Vergleich der Oberflächenstruktur von Gemeinden in Nordrhein-Westfalen anhand des Local Climate Zone – Konzeptes

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades Bachelor of Science (B.Sc.)

Erstellt am Institut für Physische Geographie und Landschaftsökologie  
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

in Kooperation mit dem Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD)  
des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Vorgelegt von: Johannes Mast

Matrikel-Nr.: 3149810

Erstprüfer: Dr. Bastian Steinhoff-Knopp

Zweitprüfer: M. Sc. Claudia Dworczyk

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD):

Betreuung: Dr. Hannes Taubenböck

Matthias Weigand

Dr. Michael Wurm

Hannover, Januar 2018



# Analyse und Vergleich der Oberflächenstruktur von Gemeinden in Nordrhein-Westfalen anhand des Local Climate Zone – Konzeptes

Analysis and Comparison of Surface Structure of Municipalities in North  
Rhine-Westphalia based on the Local Climate Zone Concept

Im Rahmen der Prüfungsordnung des Bachelorstudienganges Geographie  
am Institut für Physische Geographie und Landschaftsökologie  
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover  
durchgeführte wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades  
Bachelor of Science (B.Sc.)

Vorgelegt von:	Johannes Mast
Matrikel-Nr.:	3149810
Erstprüfer:	Dr. Bastian Steinhoff-Knopp
Zweitprüfer:	M. Sc. Claudia Dworczyk

Hannover, Januar 2018

## Danksagung

Diese Arbeit wurde in Kooperation mit dem Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen erstellt. Für die Bereitstellung der für die Durchführung der Bachelorarbeit notwendigen Daten danke ich vielmals.

Hierbei geht mein besonderer Dank an Dr. Hannes Taubenböck und Dr. Michael Wurm für die hervorragende Betreuung und konstruktive Kritik ohne welche diese Bachelorarbeit nicht zustande gekommen wäre und speziell an Matthias Weigand sowohl für die technische Unterstützung als auch für viele wertvolle Ratschläge die mir auch nach Abschluss dieser Arbeit weiter hilfreich sein werden.

Meiner Familie, die immer für mich da ist, bin ich sehr dankbar.

Abschließend danke ich auch meinen Freunden für das Korrekturlesen und allen meinen Kommilitoninnen und Kommilitonen sowie meinen Dozenten am Institut für Physische Geographie und Landschaftsökologie in Hannover für die sechs wunderbaren Semester.

# I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis.....	1
III	Abbildungsverzeichnis.....	2
IV	Tabellenverzeichnis .....	3
V	Abkürzungsverzeichnis .....	3
1	Einleitung .....	4
2	Material und Methoden.....	6
2.1	Untersuchungsgebiet.....	6
2.2	Daten.....	7
2.2.1	Local Climate Zones.....	7
2.2.2	LCZ Temperaturwerte.....	9
2.2.3	European Urban Atlas .....	10
2.3	Vorbereitung .....	11
2.4	Methoden.....	12
2.4.1	Analyse auf Gemeindeebene .....	13
2.4.2	Vergleich der Gemeindetypen .....	14
3	Ergebnisse .....	16
3.1	Profile auf Gemeindeebene .....	16
3.2	LCZ Verteilung nach Gemeindetypen .....	20
4	Diskussion.....	26
4.1	Oberflächenstruktur der Siedlungen.....	26
4.2	Geographische Verteilung der LCZ.....	27
4.3	Begrenzung des Untersuchungsgebietes.....	28
4.4	Auswirkungen der Bezugsfläche.....	28
4.5	Temperaturen der LCZ.....	28
5	Fazit .....	30
VI	Literatur- und Quellenverzeichnis .....	32
VII	Geodatenverzeichnis: .....	35
VIII	Datenquellenverzeichnis:.....	35
IX	Anhang.....	36
X	Eidesstattliche Erklärung .....	42

## II Kurzfassung

Das Ausmaß des globalen Urbanisierungsprozesses verlangt nach einer flächendeckenden Erfassung der städtischen Oberflächenstruktur und erschwert sie gleichzeitig. Die Verbindung von Technologien und Konzepten aus der Fernerkundung, Geoinformatik und Stadtklimatologie könnte es ermöglichen, einen Überblick zu gewinnen.

Das von Stewart & Oke (2012) entwickelte Local Climate Zone-Konzept kann genutzt werden, um die Oberflächenstruktur von Siedlungen objektiv und kulturneutral zu beschreiben. Um die Praktikabilität einer LCZ bezogenen Analyse zu belegen, wurde in dieser Studie eine Methodik zur Auswertung eines für Nordrhein-Westfalen mittels Fernerkundung erstellten LCZ Datensatzes entwickelt.

Die Local Climate Zones (LCZs) wurden auf Gemeindeebene aggregiert, um für jede Gemeinde ein charakteristisches Oberflächenprofil zu erstellen. Die Verbindung dieser Profile mit LCZ-bezogenen Temperaturmesswerten erlaubte eine Einschätzung der klimatischen Resilienz dieser Städte. Kategorien von Gemeinden wurden anhand verschiedener Kriterien erstellt und verglichen.

Die Ergebnisse zeigen einen ausgeprägten Zusammenhang zwischen der Bevölkerungsdichte und der erwarteten Intensität der Wärmeinsel in den Gemeinden.

## III Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Unterschiedliche urbane Siedlungsmuster. Links: Tokio in Japan. Rechts: Nildelta in Ägypten. Quelle: ESCH ET AL. 2015, S.43.....	5
Abbildung 2: Räumliche Verteilung der BBSR Stadt- und Gemeindetypen .....	14
Abbildung 4: Verteilung der Flächenanteile der LCZs über alle Gemeinden .....	17
Abbildung 5: Verteilung von Einwohnerzahl, Bevölkerungsdichte und Erwarteter Wärmeinselintensität über alle Gemeinden .....	18
Abbildung 6: Streudiagramm mit Regressionslinie von Bevölkerungsdichte gegen Einwohnerzahl. Die Größe der Punkte stellt die Einwohnerzahl der Gemeinden dar. In Grau der 95%-Vertrauensbereich, .....	19
Abbildung 7: Relative LCZ Profile der BBSR Kategorien im Vergleich .....	20
Abbildung 8: Verteilung der LCZ Klassen, getrennt nach BBSR Kategorien .....	21
Abbildung 9: Verteilung der Einwohnerzahl, Bevölkerungsdichte und Erwarteter Wärmeinselintensität, getrennt nach BBSR Kategorien .....	23
Abbildung 10: LCZ Profile von Kleinen Gemeinden (<50000 EW) und Großen Gemeinden (>50000EW) im Vergleich.....	24
Abbildung 11: LCZ Profile von dünn besiedelten Gemeinden ( $\leq 1000$ EW/km <sup>2</sup> ) und dicht besiedelten Gemeinden ( $> 1000$ EW/km <sup>2</sup> ) im Vergleich.....	25

## IV Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Lufttemperaturwerte der LCZs. Angaben sind in °C und als Differenz zwischen der jeweiligen LCZ und LCZ D Tluft <sub>x-d</sub> .....	10
Tabelle 2: Auswahl der Landnutzungsklassen des European Urban Atlas. Polygone der rot markierten Klassen wurden entfernt. ....	11
Tabelle 3: Flächenreduktion durch Beschneidung des Untersuchungsgebietes .....	12
Tabelle 4: Überblick über die erstellten Gemeindekategorien als Grundlage der Resilienzanalyse .....	15
Tabelle 5: Lage- und Verteilungswerte für die LCZs über alle Gemeinden (Mean=Arithmetisches Mittel, Stdev=Standardabweichung, VarKo=Variationskoeffizient, Skew=Schiefe) .....	17
Tabelle 6: Lage- und Verteilungsmaße für Einwohnerzahl, Bevölkerungsdichte und Erwartete Wärmeinselintensität über alle Gemeinden (Mean=Arithmetisches Mittel, Stdev=Standardabweichung, VarKo=Variationskoeffizient, Skew=Schiefe) .....	18
Tabelle 7: Profile der fünf Gemeinden mit der höchsten Erwarteten Wärmeinselintensität (UHI Risk) .....	19
Tabelle 8: Profile der fünf Gemeinden mit der niedrigsten Erwarteten Wärmeinselintensität (UHI Risk) .....	19
Tabelle 9: ungewichtete LCZ Profile der erstellten Kategorien .....	22
Tabelle 10: Lage- und Verteilungsmaße für die Erwartete Wärmeinselintensität der Kategorien .....	23

## V Abkürzungsverzeichnis

UN	United Nations (englisch), Vereinte Nationen(deutsch)
BBSR	Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung
LCZ	Local Climate Zone
EUAtlas	European Urban Atlas
NRW	Nordrhein-Westfalen
ESA	European Space Agency
NIR	Nahes Infrarot
EW	Einwohner

# 1 Einleitung

Städte sind schon seit Jahrtausenden das soziale und wirtschaftliche Herz der Zivilisation und haben sich im Laufe der Zeit stets auf dynamische Weise an die vielseitigen Einflüsse angepasst, mit denen sich die Menschen konfrontiert sahen. In den letzten Jahrzehnten jedoch erfuhren urbane Regionen ein Wachstum, welches an Geschwindigkeit und Dynamik alle bisher gekannten Entwicklungen in den Schatten stellt (ESCH ET AL. 2015). Über die Hälfte der Weltbevölkerung lebt bereits heute in Städten, und bis zum Jahr 2050 werden es voraussichtlich zwei Drittel sein (DEUTSCHES INSTITUT FÜR ENTWICKLUNGSPOLITIK 2017).

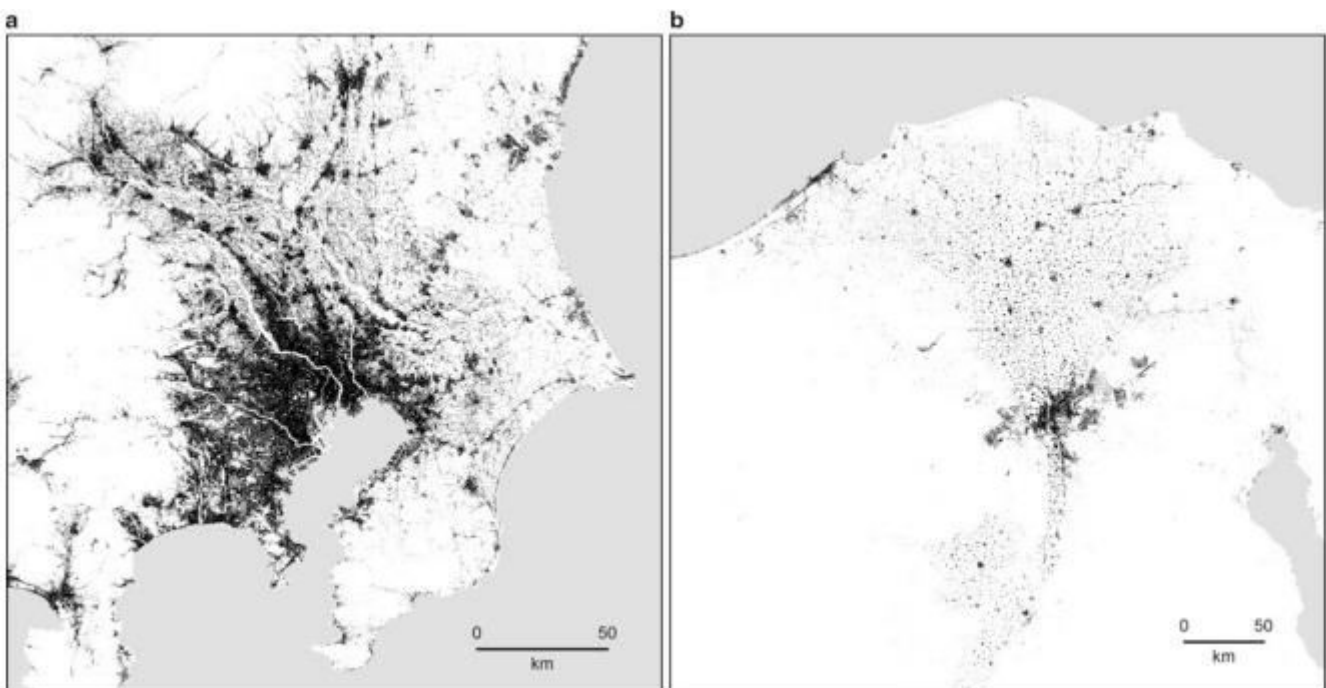
Einerseits steigt damit die Bedeutung der Städte für unsere gesamte Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt: Auf nur 3% der Fläche des Planeten werden 60-80% der Energie verbraucht und 75% der Kohlenstoffemissionen generiert und ein Großteil der weltweiten Wirtschaftsleistung generiert (UN 2017). Zum anderen steigt auch die Bedeutung der städtischen Umgebung für die Menschen, die oftmals den Hauptteil ihres Lebens in ihnen verbringen. Denn die Beziehung von Mensch und Stadtklima ist keine Einbahnstraße: Studien von POUMADERE ET AL. (2005) und SCHERER ET AL. (2014) zeigen, dass Hitzewellen in europäischen Städten für einen Großteil der Todesopfer aus Naturkatastrophen und für deutlich mehr Todesopfer verantwortlich sind als Verkehrsunfälle. Unter den erhöhten Temperaturen leiden vor allem alte, schwache oder kranke Menschen ohne Zugang zu Kühlungs- und Belüftungssystemen. Bereits benachteiligte Bevölkerungsgruppen werden damit am stärksten belastet. Sozioökonomische Ungleichheiten können durch den städtischen Wärmeinseleffekt also noch verstärkt werden (ŽUVELA-ALOISE 2017).

Die Städte, welche einem Großteil der Menschen als Lebensraum dienen, sehen sich einem enormen Druck ausgesetzt dem sie oftmals nicht gewachsen sind. Infolgedessen wachsen besonders in Entwicklungsländern die Slums, unüberschaubare Gebiete ohne geplante Infrastruktur. Gleichzeitig bietet die Konzentration der Menschen auf einen engen Raum auch Chancen, Aussichten auf Effizienzsteigerungen und technologische Innovation. Um die Chancen zu nutzen und die Risiken zu minimieren haben sich die Vereinten Nationen sich in Ziel 11 der Sustainable Development Goals verpflichtet, Städte inklusiv, sicher, resilient und nachhaltig zu gestalten (UN 2017). So wird eine effizientere Ressourcenallokation angestrebt, Strategien zur Anpassung und Minderung des Klimawandels sowie zur Verbesserung der Luftqualität entwickelt und die Bereitstellung von öffentlichen Grünflächen für die gesamte Stadtbevölkerung vorangetrieben. Um diese Ziele zu erreichen ist es zunächst notwendig, die Struktur urbaner Räume zu erfassen und zu verstehen. Nur so können eine Einschätzung der Situation und der Prozesse, eine Einschätzung des Handlungsbedarfs und auch eine bestmögliche Ressourcenallokation erfolgen.

Aus dem Ausmaß des globalen Wandels ergeben sich dabei besondere Herausforderungen: Zum einen versagen traditionelle Methoden angesichts der flächenhaften Ausdehnung und dem dynamischen Wachstum der Städte. Die flächenhafte Erfassung der Oberflächenstruktur mit ausreichendem Detailgrad und Regelmäßigkeit ist mit vor-Ort Methoden nicht mehr zu meistern.

Doch zunehmend gibt es Alternativen: Dank der satellitengestützten Fernerkundung stehen flächendeckende und aktuelle Daten über administrative Grenzen hinweg bereit. Entwicklungen in der Informatik, speziell im Bereich des maschinellen Lernens, ermöglichen die teilautomatisierte Auswertung von großen Datensätzen. Durch Verbindung von Technologien aus diesen Wissenschaftsbereichen ist es möglich, trotz des globalen Ausmaßes der Urbanisierung deren Auswirkungen und Prozesse hochgenau zu erfassen.

Eine weitere Herausforderung ergibt sich aus der Vielfalt globaler Siedlungsmuster. Städte können sich über Kulturräume hinweg teils erheblich in ihren Strukturen unterscheiden (vgl. Abbildung 1). Selbst der Begriff Stadt kann auf unterschiedlichen Erdteilen eine ganz unterschiedliche Bedeutung haben. Eine simple Aufteilung der Erdoberfläche in die zwei Kategorien „Stadt“ und „Land“ ist aufgrund dieser Komplexität nicht ausreichend. Das Phänomen „Stadt“ sollte daher auf eine Weise messbar gemacht werden, welche nicht nur differenziert, sondern auch objektiv und kulturell neutral ist, um einen hohen Grad an internationaler und interkultureller Vergleichbarkeit zu ermöglichen und einen Rahmen für interdisziplinären Austausch zu schaffen.



**Abbildung 1: Unterschiedliche urbane Siedlungsmuster. Links: Tokio in Japan. Rechts: Nildelta in Ägypten. Quelle: ESCH ET AL. 2015, S.43**

Ähnliche Bedenken bewegten STEWART & OKE (2012) zur Entwicklung des Local Climate Zone Konzeptes. Ursprünglich für Messungen des städtischen Wärmeinseleffekts vorgesehen, stellt es eine Möglichkeit dar, die Oberflächenstruktur des urbanen Raumes objektiv und kulturneutral zu beschreiben. Es unterteilt die Erdoberfläche in 17 Klassen, von denen 10 verschiedene Grade der Bebauung (beispielsweise: *Compact high-rise*, *Lightweight low-rise*) und 7 Arten der Landbedeckung (beispielsweise: *Water*, *Bare soil*) darstellen.

Von TUIA ET AL. (2017) wurde gezeigt, dass LCZs über eine Kombination verschiedener Fernerkundungsdaten großflächig kartiert werden können.



In dieser Arbeit soll geprüft werden, inwiefern das LCZ Konzept genutzt werden kann, um die Oberflächenstruktur von Siedlungen zu charakterisieren und zu vergleichen. Dies soll exemplarisch am Beispiel von Gemeinden in Nordrhein-Westfalen geschehen.

Es soll ferner getestet werden, inwieweit die Verknüpfung von durch LCZs beschriebenen Oberflächenprofilen mit LCZ bezogenen Forschungsdaten valide ist, und welche Probleme sich dabei identifizieren lassen. Hierzu soll die klimatische Resilienz der Gemeinden Nordrhein-Westfalens mittels Anwendung von auf LCZs bezogenen Temperaturwerten analysiert werden.

Hierbei ist von besonderem Interesse, ob ein Zusammenhang zwischen der Größe der Gemeinden und ihrer Struktur besteht, und ob sich Gemeinden identifizieren lassen, welche sich durch besonders vorteilhafte oder ungünstige Strukturen hervorheben.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Untersuchungsgebiet

Die Region des heutigen Nordrhein-Westfalens war schon seit dem Mittelalter von bedeutenden Fernverkehrswegen wie dem Rhein und dem Hellweg durchzogen, jedoch bis in die erste Hälfte des 19. Jahrhunderts agrarisch geprägt (GLASER ET AL. 2007).

Nach dem Einsetzen der Industrialisierung ab 1850 entstanden umfangreiche Bergbau-gesellschaften, Eisen- und Stahlunternehmen. Insbesondere im Ruhrgebiet entwickelte sich ein völlig neues Industriegebiet, das auf der Kohleförderung und Schwerindustrie basierte. Das Wachstum zog Zuwanderer aus anderen Provinzen des Deutschen Reichs an, und die Städte wuchsen massiv an. Es entstanden Arbeitersiedlungen und Industriedörfer die sich in ihrer Struktur stark von den bisher gekannten Siedlungsräumen unterschieden (GLASER ET AL. 2007).

Mit der ersten Kohlekrise ca. 1960 begann eine ausgeprägte Strukturkrise, welche durch die Schließung von Zechen und Schwerindustrieeinrichtungen gekennzeichnet war. Der Strukturwandel zog sich über die nächsten Jahrzehnte hin und führte zur Transformation des „Kohlelandes“ zum „Wissenschaftsland“ NRW (STAATSKANZLEI NORDRHEIN-WESTFALEN 2017).

Heute ist das Land mit ca. 17,9 Millionen Einwohnern das bevölkerungsreichste Bundesland Deutschlands und das am dichtesten besiedelte Flächenland. Insgesamt gibt es in NRW 29 Städte mit über 100.000 Einwohnern, von denen Köln mit 1,06 Millionen Einwohnern die bevölkerungsreichste und ist (STAATSKANZLEI NORDRHEIN-WESTFALEN 2017). Die Region besitzt einen ausgeprägten urbanen Charakter und liegt im Herzen der europäischen Mega-region, welche seit BRUNET (1989) oft als „Blaue Banane“ bezeichnet wird.

Aufgrund ihrer zentralen Lage, ihrer bewegten Geschichte und ihrer vielseitigen urbanen Strukturen eignet sich diese Region wie kaum eine andere zur Untersuchung dynamischer urbaner Prozesse und Strukturen.

In dieser Arbeit soll sie daher mittels des LCZ-Konzeptes untersucht werden. Die grundlegende geografische Einheit, welche hierfür genutzt werden soll, ist die Gemeinde. Über den Webdienst der Bezirksregierung Köln wurden die Digitalen Verwaltungsgrenzen in Vektorformat bezogen. Um die spätere Verarbeitung zu erleichtern, wurde die durch Ausdünnung und Douglas-Peucker-Algorithmus reduzierte Version DVG2 gewählt (BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2017).

Dem über die Landesdatenbank Nordrhein-Westfalen bezogenen Zensus 2011 wurden die Einwohnerzahlen auf Gemeindeebene entnommen (IT.NRW, 2017).

## 2.2 Daten

Im folgenden Kapitel soll ein Überblick über die wichtigsten in dieser Arbeit genutzten Daten gegeben werden. Zentrale Aspekte sind hierbei der Forschungsstand, die Quellen und die Aufbereitung der Daten.

### 2.2.1 Local Climate Zones

Das von STEWART & OKE (2012) ursprünglich als Rahmen zur Standardisierung von stadtklimatischen Messungen entwickelte Local Climate Zone-Konzept unterteilt die Erdoberfläche in 17 individuell benannte Klassen mit charakteristischen geometrischen- und klimatischen Eigenschaften. Eine Übersicht über die LCZ Klassen ist dem Anhang zu entnehmen. Die Einteilung in diese Klassen kann anhand dieser Eigenschaften erfolgen, zu denen beispielsweise die Albedo, die Rauigkeit und der Gebäudeanteil der Oberfläche gehören. Dies ist im Rahmen konventioneller kartographischer Methoden jedoch mit großem Aufwand verbunden und lässt sich schwer auf große Untersuchungsgebiete ausweiten.

In den letzten Jahren haben jedoch Fortschritte in der Fernerkundung und Geoinformatik neue Möglichkeiten offenbart. Mehrere Studien haben gezeigt, zeigen, dass es möglich ist, durch eine Kombination verschiedenster Datenquellen in maschinellen Lernverfahren großflächig Fernerkundungsdaten auszuwerten und eine detaillierte Klassifizierung auch für große Untersuchungsgebiete vorzunehmen:

WURM ET AL. (2009) entwickelten eine übertragbare Methodik zur automatisierten Klassifizierung von Stadtstrukturtypen (Urban Structural Types = USTs). Diese ähneln den LCZs in ihrer relativ groben Auflösung und darin, dass sie in der Regel nicht die Eigenschaften eines Pixels, sondern vielmehr die Struktur und Textur eines Gebiets- beispielsweise eines Baublocks- beschreiben. Als Datenquellen dienten hierbei hochaufgelöste Spektralbilder des IKONOS Satelliten und durch LiDAR erfasste Digitale Oberflächenmodelle, welche unabhängig voneinander zunächst eine Segmentierung und danach eine objektbasierte Klassifizierung erfuhren. Die darauf aufbauende Kombination beider Quellen ermöglichte es, auf Baublockebene 20 verschiedene USTs zu unterscheiden.

Darauf aufbauend wurde 2011 ein ähnliches Verfahren zur Klassifizierung von Landbedeckung und Landnutzung entwickelt (WURM ET AL. 2011). Hier wurden zunächst die Gebäudegeometrien aus Digitalen Oberflächenmodellen (erfasst durch LiDAR in Köln und HRSC-AX in München) extrahiert. Diese dienten dann als zusätzlicher Input für die Segmentierung und Klassifizierung der Objekte in optischen Satellitenbildern. In diesen Verfahren wurde gezeigt, dass die Nutzung zusätzlicher Geometrien aus ATKIS und Openstreetmap Daten zur Unterstützung der Methodik möglich ist.

BECHTEL ET AL. (2015) zeigten dass es möglich ist, mittels eines überwachten Klassifizierungsverfahrens (Random-Forest) und anschließenden Mehrheitsfilters eine LCZ basierte Klassifizierung der Oberfläche vorzunehmen. Hierbei wurde ausschließlich mit kostenfreien Programmen und Satellitendaten gearbeitet, die notwendige Anwendung des Mehrheitsfilters nach der Klassifizierung erwies sich jedoch teilweise als problematisch. (GAL ET AL, 2015)

Dem gegenüber nutzte von LELOVICS ET AL (2014) entwickelte GIS-basierte Methode eine sehr große Anzahl an Eingangsdaten wie 3D-Gebäudedatenbanken, multispektrale Satellitenbilder und das CORINE Land Cover um die verschiedenen Oberflächeneigenschaften wie Albedo, Oberflächenrauigkeit und Gebäudeanteil, welche von Stewart und Oke zur Klassifizierung der LCZ vorgeschlagen wurden, bestmöglich zu erfassen.

Eine Studie von PONCET ET AL (2015) nutzte eine noch größere Vielfalt an Datenquellen, darunter Landbedeckungsdaten, 3D-Stadtmodelle, optische Bilder und öffentliche Geoinformationen, um USTs in 200mx200m großen Kacheln zu erfassen. Die Nutzung einer Support Vector Machine demonstrierte, dass auch bei einer großen Anzahl an Eingangsdaten maschinelle Lernverfahren zur Verbesserung und Automatisierung der Klassifizierungsprozesse genutzt werden können.

Diese Studien zeigen dass eine Kombination verschiedenster Geodaten zur LCZ-Kartierung genutzt werden kann. Dies geschah auch bei der Erstellung des in dieser Arbeit genutzten LCZ Datensatzes: Auf der Studie von Poncet aufbauend entwickelten TUIA ET AL. (2017) eine vergleichbare Methodik um LCZs in Nordrhein-Westfalen flächendeckend zu erfassen.

Hierbei wurden in einem Gitter mit 200m x 200m Zellgröße für jede Zelle zunächst eine Reihe von Features aus folgenden Daten bestimmt:

- Landbedeckung: Ein aus einem Mosaik der Rapid-Eye Satelliten abgeleitetes Raster welches den prozentualen Bebauungsgrad angibt.
- Fernerkundung: Bereinigte Bilder des Untersuchungsgebiets aller fünf Kanäle (R, G, B, RedEdge, NIR) des Rapid-Eye
- Räumliche Textur: Aus Grauwertmatrizen der Rapid-Eye Bilder abgeleitete Texturfeatures
- 3D-Modell: Ein normalisiertes Oberflächenmodell aus Cartosat-1 Stereobildern wurde ausgewertet, um die Höhen der Landbedeckung zu bestimmen, woraus auch Größe und Anzahl der Gebäude abgeleitet wurden.

- Öffentliche Geoinformation: Aus Openstreetmap Daten wurden Punktoobjekte wie Haltestellen und Linienobjekte wie Straßen abgeleitet. Durch Glättung wurde die Dichte an derartigen Objekten bestimmt.

Auch hier wurde ein Random Forest Verfahren mit 100 Bäumen, verwendet, um jede Zelle einer LCZ Klasse zuzuordnen. Der Vergleich mit Referenzdaten zeigte eine Gesamtgenauigkeit von 91,93% und eine Durchschnittsgenauigkeit von 87,46%.

Der Datensatz enthält LCZs auf einer Gesamtfläche von etwa 34000 km<sup>2</sup> was eine Abdeckung von 99,16% der 34 092km<sup>2</sup> großen Gesamtfläche Nordrhein-Westfalens darstellt

Für NRW wurden 12 der 17 LCZ Klassen klassifiziert. Die LCZ 1 (*Compact high-rise*), 3 (*Compact low-rise*), 7 (*Lightweight low-rise*), C (*Bush, Scrub*) und E (*Bare Rock*) tauchen in dem Datensatz nicht auf.

## 2.2.2 LCZ Temperaturwerte

Zur Analyse der klimatischen Resilienz ist es notwendig, die LCZs mit konkreten Temperaturwerten zu verbinden. Hierfür wurde eine strukturierte Auswertung von 12 bestehenden stadtklimatischen Studien vorgenommen. Die Ergebnisse werden im Folgenden zusammengetragen.

Da das Konzept der LCZs noch relativ jung ist, sind die auf LCZs bezogenen Studien begrenzt in ihrer Anzahl und heterogen in ihrer Methodik. STEWART (2011) analysierte in seiner Dissertation ältere Datensätze, welche sich durch ausgezeichnete Dokumentation der Metadaten hervorhoben, was es erlaubte, die gemessenen Temperaturen nachträglich LCZs zuzuordnen. Viele der Studien wurden durch regelmäßige Messfahrten mit einem mobilen Temperatursensor durchgeführt (z.B. LECONTE ET AL. 2017). In einigen dieser Studien wurden zusätzlich Referenzstationen genutzt (z.B. STEWART 2011). Eine Studie von FENNER ET AL. (2017) in Berlin nutzte Citizen Weather Stations (CWS) in Kombination mit Referenzstationen um eine maximale Flächendeckung zu erreichen. In einigen Studien wurden jedoch auch Oberflächentemperaturen basierend auf Fern-erkundungsdaten der LANDSAT-8 und ASTER Sensoren bestimmt (CHEN ET AL. 2017; GELETIC ET AL. 2017). Dies ermöglicht eine hohe Flächendeckung, allerdings lässt sich hierbei nur die Oberflächentemperatur und nicht die Lufttemperatur bestimmen, welche mitunter stark differieren können.

MIDDEL ET AL. (2013) nutzten mikroklimatische Simulationen, welche über Referenzstationen validiert wurden, zur Modellierung der Lufttemperatur in verschiedenen, an LCZs orientierten idealtypischen Umgebungen.

Eine Gemeinsamkeit der Studien bestand darin, dass sie einen lokalen Charakter hatten, sich also in der Regel auf das Gebiet einer Stadt beschränkten. Infolgedessen gab es keine Studie, welcher alle notwendigen Lufttemperaturwerte entnommen werden konnten. Es war daher notwendig die Ergebnisse verschiedener Studien zu kombinieren.

Die vorliegenden Studien wurden dabei auf folgende Kriterien hin untersucht:

- Abdeckung der LCZ Klassen
- Dokumentation und Qualitätssicherung
- Methodik der Temperaturmessung
- Geographische Distanz zum Untersuchungsgebiet NRW

Es wurden drei Studien ausgewählt, welche in Kombination für 10 der 13 notwendigen LCZs valide Temperaturwerte bereitstellten (siehe Tabelle 1). Zwei der Studien wurden von LECONTE ET AL (2015; 2017) in der Stadt Nancy (Frankreich) durchgeführt. Die Studie in Berlin wurde über einen längeren Zeitraum von FENNER ET AL. (2017) durchgeführt. Für die weitere Arbeit wurden diejenigen Temperaturwerte ausgewählt, welche unter Idealbedingungen gemessen wurden. Dies bedeutet konkret, dass geringe Bewölkung und niedrige Windgeschwindigkeiten vorlagen, was die Ausbildung von Temperaturdifferenzen zwischen den verschiedenen LCZs fördert (FENNER ET AL. 2017).

Da bei der Erfassung der LCZs in Nancy kein klarer Übergang zwischen LCZ 6 (*Open low-rise*) und LCZ 9 (*Sparsely built*) gesehen wurde, waren diese in die Studie zusammengelegt worden. Der LCZ übergreifende Wert wurde zum Zwecke dieser Auswertung für beide LCZs angenommen. Als Referenzpunkt wurde LCZ D (*Low plants*) gewählt, welche als typisch rural betrachtet werden kann. Diese LCZ wurde mit dem Wert 0 bewertet. Für alle anderen LCZs wurde der Mittelwert der in den Studien gemessenen Temperaturdifferenzen  $T_{LCZx-d}$  berechnet. Ausnahmen bilden die LCZs 10 (*Heavy industry*), F (*Bare soil*) und G (*Water*). Für diese konnten keine sinnvollen Werte gefunden werden. Sie wurden daher wie LCZ D mit dem Wert 0 belegt.

**Tabelle 1: Lufttemperaturwerte der LCZs. Angaben sind in °C und als Differenz zwischen der jeweiligen LCZ und LCZ D  $T_{Luft_{x-d}}$**

	2	4	5	6	8	9	10	A	B	D	F	G
Nancy (2015)	4,4		4,2	2,4	2,9	2,4						
Nancy (2017)	4,4		4,3	3	2,6	3				0		
Berlin (2017)	5,4	4,3	3,9	1,8		1,3		1,9	0	0		
Arithmetisches Mittel	4,73	4,30	4,13	2,40	2,75	2,23	-	1,90	0,00	0,00	-	-

### 2.2.3 European Urban Atlas

In dieser Studie soll der städtische Raum das Objekt der Analyse sein. Um das Untersuchungsgebiet auf diesen zu reduzieren, wurde auf den frei zugänglichen European Urban Atlas (EUAtlas) zurückgegriffen, welcher im Rahmen des COPERNICUS Programms der Europäischen Weltraumorganisation ESA erstellt wurde. Der EUAtlas bietet hochaufgelöste Karten der in 17 thematische Klassen unterteilten Landnutzung für 305 urbane Räume in Europa (EEA 2010).

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die für das Jahr 2012 erstellten European Urban Atlas Zonen der Regionen Aachen, Bielefeld, Bonn, Düsseldorf, Iserlohn, Krefeld, Köln, Mönchengladbach, Münster, Paderborn, Remscheid, Ruhrgebiet, Siegen, Solingen und Wuppertal verwendet. Aus den Landnutzungsklassen des EUAtlas wurden diejenigen ausgewählt, welche eine eindeutig urbane Natur aufweisen (siehe Tabelle 2). Diese Auswahl wurde auf die Polygone der EUAtlas Shapes angewandt.

**Tabelle 2: Auswahl der Landnutzungsklassen des European Urban Atlas. Polygone der rot markierten Klassen wurden entfernt.**

Landnutzungsklassen des European Urban Atlas
11100: Continuous Urban fabric (S.L. > 80%)
11210: Discontinuous Dense Urban Fabric (S.L.: 50% - 80%)
11220: Discontinuous Medium Density Urban Fabric (S.L.: 30% - 50%)
11230: Discontinuous Low Density Urban Fabric (S.L.: 10% - 30%)
11240: Discontinuous very low density urban fabric (S.L. < 10%)
11300: Isolated Structures
12100: Industrial, commercial, public, military and private units
12210: Fast transit roads and associated land
12220: Other roads and associated land
12230: Railways and associated land
12300: Port areas
12400: Airports
13100: Mineral extraction and dump sites
13300: Construction sites
13400: Land without current use
14100: Green urban areas
14200: Sports and leisure facilities
21000: Arable land (annual crops)
22000: Permanent crops
23000: Pastures
24000: Complex and mixed cultivation patterns
25000: Orchards
31000: Forests
32000: Herbaceous vegetation associations
33000: Open spaces with little or no vegetations
40000: Wetlands
50000: Water

## 2.3 Vorbereitung

Zur Vorbereitung, Analyse und späteren Darstellung wurde hauptsächlich mit der Skriptsprache R gearbeitet. Zur Visualisierung kamen außerdem die Programme ArcGIS und MS Excel zum Einsatz.

Zu Beginn wurden alle Geodaten in das Koordinatensystem *WGS 1984 UTM Zone 32N* überführt. Der LCZ Datensatz, welcher ursprünglich im Vektorformat in Form rasterartiger angeordneter Kacheln vorlag, wurde in ein Rasterformat konvertiert.

Für die ausgewählten Gemeinden wurden Flächen berechnet und Bevölkerungsstatistiken als Attribut hinzugefügt. Aus dem Verhältnis von Bevölkerungszahl und Fläche konnte so die Bevölkerungsdichte für jede Gemeinde bestimmt werden, welche später zur Erstellung von Kategorien von Gemeinden genutzt wurde.

Die Polygone des EUAtlas, welche eine urbane Natur aufweisen, wurden ausgewählt und alle anderen verworfen (siehe Tabelle 2). Daraufhin wurden die Gemeindegrenzen mit den ausgewählten EUAtlas Polygonen verschnitten. Alle Attribute der Gemeinden wurden dabei beibehalten, auch die Bevölkerungsdichte, welche sich daher immer noch auf die Verwaltungseinheit bezieht und nicht auf die nun reduzierten Untersuchungsgebiete. Da die EUAtlas Regionen nur einen Teil NRWs abdeckten, reduzierte sich die Anzahl an Gemeinden während diesem Arbeitsschritt.

Um Störeinflüsse an Randpixeln zu minimieren, wurde ein negativer Puffer mit Distanz -200m -entsprechend einer Zelle- des LCZ Datensatzes erstellt. Gemeinden am Rand des Untersuchungsgebietes wurden dadurch minimal weiter reduziert.

Anschließend wurde die Fläche der Gemeinden neu berechnet, und solche Gemeinden, welche nun eine sehr geringe Fläche von weniger als 1 km<sup>2</sup> aufwiesen, wurden entfernt und in der folgenden Analyse nicht weiter berücksichtigt. Nach allen Vorverarbeitungsschritten verblieben 172 der ursprünglich 396 Gemeinden Nordrhein-Westfalens. Durch diese Vorverarbeitung reduzierte sich die Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets auf ca. 21% des ursprünglichen Gebietes aller Gemeinden Nordrhein- Westfalens (vgl. Tabelle 3).

**Tabelle 3: Flächenreduktion durch Beschneidung des Untersuchungsgebietes**

	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Anteil an der Gesamtfläche NRW [%] (nach IT. NRW. 2017)
Gesamtfläche NRW (nach IT.NRW 2017)	34092	100,00%
Gemeindegrenzen aus DVG2	34096	100,01%
LCZ Datensatz	33805	99,16%
LCZ (mit EUAtlas verschnitten)	7303	21,42%
LCZ (negativ gepuffert und mit EUAtlas verschnitten)	7159	21,00%

## 2.4 Methoden

Ziel der Arbeit ist es, eine experimentelle Analyse der Oberflächenstruktur Nordrhein-Westfalens auf Basis des LCZ Datensatzes durchzuführen. Dies wurde in zwei Schritten durchgeführt:

Zunächst wurden Oberflächenprofile für jede Gemeinde berechnet. In einem zweiten Schritt wurden die Gemeinden anhand verschiedener Kriterien, zu denen sowohl bereits existierende Klassifikationen als auch numerische Grenzwerte gehören, in Kategorien zusammengefasst und diese dann verglichen.

### 2.4.1 Analyse auf Gemeindeebene

Die LCZ-Pixel wurden zunächst auf Gemeindeebene aggregiert. Hierbei wurden auch die anteiligen Überlappungen an Grenzpixeln berücksichtigt. Pixel, welche keine Gemeindeflächen schneiden, wurden ignoriert. Darüber hinaus wurden fehlerhafte Werte (NA) entfernt. Somit ergibt sich ein Profil welches für jede Gemeinde die Anteile der LCZ Klassen an der Gesamtfläche darstellt, vergleichbar mit einem Histogramm.

Diese Anteile konnten nun mit den in 2.2.2. beschriebenen Temperaturwerten verknüpft werden. Hierfür wurden die Mittelwerte der recherchierten Temperaturdifferenzen  $T_{luft_{x-d}}$  mit den Anteilen der LCZ Klassen multipliziert. Für die Klassen, für die keine Temperaturwerte vorlagen, wurde der Wert 0 angenommen. Es ergibt sich somit ein dimensionsloser Index der erwarteten Wärmeinselintensität der Gemeinden. Dieser würde, falls die Fläche der Gemeinde ausschließlich die Bezugsklasse LCZ D (*Low plants*) aufweisen würde, den Wert 0 ( $100\% * 0^\circ$ ) annehmen, falls die Fläche ausschließlich von LCZ 2 (*Compact midrise*) bedeckt wäre, den Wert 473 ( $100\% * 4,73^\circ$ ).

Um die Verteilung der LCZs über alle Gemeinden zu beschreiben wurden folgende Lage- und Verteilungswerte für jede LCZ bestimmt:

**Minimum** (Min) und **Maximum** (Max) geben die geringste beziehungsweise größte Ausprägung des Merkmals, also der LCZ Flächenanteile an.

Der **Median** ist der Wert, welcher in der Mitte der Datenverteilung liegt (STATISTA 2017)

**Mittelwert** (Mean): entspricht der Summe aller Werte geteilt durch die Anzahl der Gemeinden. Dieser Wert wird stärker von Ausreißern beeinflusst, als der Median.

**Standardabweichung** (Stdev) gibt die durchschnittliche Entfernung aller Werte vom Mittelwert an. Eine größere Standardabweichung lässt daher auf eine stärkere Streuung schließen.

Der **Variationskoeffizient** (VarKo) ist der Quotient aus der Standardabweichung und dem Mittelwert und gibt die relative Streuung an.

Die **Schiefte** (Skew) wurde mittels einer Schätzfunktion geschätzt (WEISSTEIN, 2017). Die Schiefe beschreibt die Asymmetrie einer Verteilung. Ein positiver Wert der Schiefe deutet auf eine rechtsschiefe Verteilung hin, also ein häufigeres Auftreten von Werten unterhalb des Mittelwertes. Ein negativer Wert der Schiefe deutet umgekehrt eine linksschiefe Verteilung mit häufigem Auftreten von überdurchschnittlichen Werten auf. Eine Schiefe von 0 entspricht einer symmetrischen Verteilung.

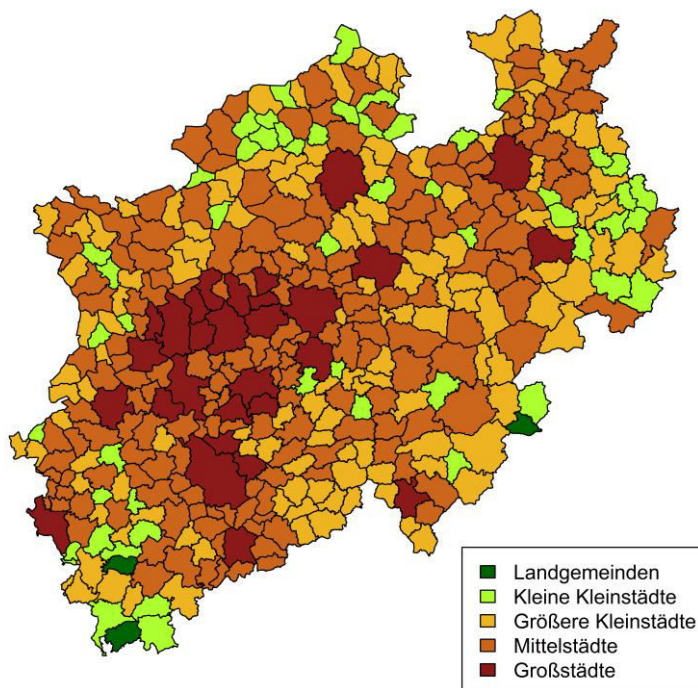


## 2.4.2 Vergleich der Gemeindetypen

Im Zweiten Schritt wurden Gemeinden anhand verschiedener Kriterien in Kategorien gruppiert und für diese Kategorien Oberflächenprofile, Kenngrößen und Verteilungswerte berechnet. Als Kriterium zur Einteilung in Kategorien diente entweder eine bereits existierende Klassifizierung der Gemeindeart, Grenzwerte der Einwohnerzahl oder Grenzwerte der Bevölkerungsdichte.

Für jede Kategorie wurde aus den LCZ Profilen der Gemeinden ein Kategorie-umfassendes LCZ Profil berechnet. Hierbei wurden die Gemeinden nicht nach Fläche oder Einwohnerzahl gewichtet, was bedeutet dass kleine Gemeinden gleichwertig zu größeren Gemeinden behandelt wurden. Die LCZ Profile der Kategorien entsprechen daher dem gemittelten Profil aller Gemeinden der Kategorie, und geben nicht das LCZ Profil der Gesamtfläche der Kategorie an.

Um die Verteilung der LCZs innerhalb der Kategorien analysieren zu können, wurden auch hier wieder Lage- und Verteilungswerte bestimmt. Es soll klar darauf hingewiesen werden, dass die Minimum- und Maximumwerte für Einwohnerzahl und Bevölkerungsdichtung auch hier neu berechnet wurden und nicht den Grenzwerten entsprechen welche zur Erstellung der Kategorien dienen.



**Abbildung 2: Räumliche Verteilung der BBSR Stadt- und Gemeindetypen**

Zur Einteilung der Gemeinden in Kategorien wurde zunächst der Stadt- und Gemeindetyp des BBSR genutzt. Dieser ordnet die Gemeinden in die Kategorien Groß-, Mittel-, Kleinstädte und Landgemeinden. Als Kriterien dienen hierbei die Bevölkerungszahl und die zentral-örtliche Funktion der Gemeinde (BBSR, 2017).

In Nordrhein-Westfalen befinden sich nach dieser Klassifizierung insgesamt 3 Landgemeinden, 53 Kleine Kleinstädte, 131 Größere Kleinstädte, 180 Mittelstädte und 29 Großstädte (siehe Abbildung 2).

Anhand der Stadt- und Gemeindetypen des BBSR wurden die 172 Gemeinden zunächst in 5 Klassen aufgeteilt, auf welchen in folgenden der Schwerpunkt der Analyse lag.

Zur Unterstützung der Analyse wurden die Gemeinden nach Bevölkerungsdichte in zwei Kategorien „dicht besiedelte Gemeinden“ und „dünn besiedelte Gemeinden“ aufgeteilt. Schwellwert war hierbei eine Bevölkerungsdichte von 1000 EW/km<sup>2</sup>. Eine letzte Aufteilung erfolgte nach der Einwohnerzahl der Gemeinden. Alle Gemeinden mit einer Bevölkerung von 50.000 Einwohnern oder weniger wurden als „kleine Gemeinden“ eingestuft, alle darüber als „große Gemeinden“. Die Klassifizierungen nach den Werten Bevölkerungsdichte und Einwohnerzahl sind bewusst grob gehalten, um anhand einer großen Anzahl von Stichproben eine möglichst stichfeste Analyse der Auswirkungen der oben genannten Größen zu erstellen.

**Tabelle 4: Überblick über die erstellten Gemeindekategorien als Grundlage der Resilienzanalyse**

Kategorisierung	Name	Auswahlkriterium	Anzahl Gemeinden
Stadt- und Gemeindetyp	Landgemeinden	BBSR Typ = Landgemeinde	0
	Kleine Kleinstädte	BBSR Typ = KleineKleinstadt	8
	Größere Kleinstädte	BBSR Typ = GrößereKleinstadt	38
	Mittelstädte	BBSR Typ = Mittelstadt	97
	Großstädte	BBSR Typ = Großstadt	29
Bevölkerungsdichte	Dünn besiedelte Gemeinden	Bevölkerungsdichte <= 1000 EW/km <sup>2</sup>	118
	Dicht besiedelte Gemeinden	Bevölkerungsdichte > 1000 EW/km <sup>2</sup>	54
Einwohnerzahl	Kleine Gemeinden	Einwohnerzahl <= 50000	114
	Große Gemeinden	Einwohnerzahl > 50000	58

### 3 Ergebnisse

Die in 2.4.1 beschriebene Methodik lieferte eine große Anzahl an Werten. Primär sind dies die 172 LCZ Profile, welche für jede Gemeinde die Flächenanteile der verschiedenen LCZ angeben, sowie die berechnete erwartete Wärmeinselintensität. Hinzu kamen Statistiken zur Verteilung dieser Werte über die Gesamtheit aller Gemeinden.

Da es nicht sinnvoll ist, an dieser Stelle alle 172 Gemeinden zu betrachten, soll in 3.1 lediglich ein statistischer Überblick über die Ergebnisse gegeben werden. Eine Tabelle mit allen LCZ Profilen befindet sich im Anhang dieser Arbeit.

Auch für die in Schritt 2 erstellten verschiedenen Kategorien wurden, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, Durchschnittsprofile und Statistiken berechnet. Diese werden in 3.2 präsentiert.

#### 3.1 Profile auf Gemeindeebene

In diesem Kapitel soll zunächst die Verteilung der LCZ über alle Gemeinden anhand der berechneten Statistiken erläutert werden. Darauf folgt eine kurze Beschreibung der Verteilungen von Einwohnerzahl, Bevölkerungsdichte und der berechneten erwarteten Wärmeinselintensität.

Abbildung 3 und Tabelle 5 zeigen die Verteilung der LCZ Klassen über alle Gemeinden. LCZ B (*Scattered trees*) war im Mittel mit 30,22% Flächenanteil die häufigste LCZ, gefolgt von LCZ 9 (*Sparsely built*) mit 23,31% und 6 (*Open low-rise*) mit 14,07%.

Die insgesamt seltensten LCZs waren LCZ 4 (*Open high-rise*) mit 0,01%, LCZ 2 (*Compact midrise*) mit 0,15% und LCZ G (*Water*) mit 0,26% der Gesamtfläche.

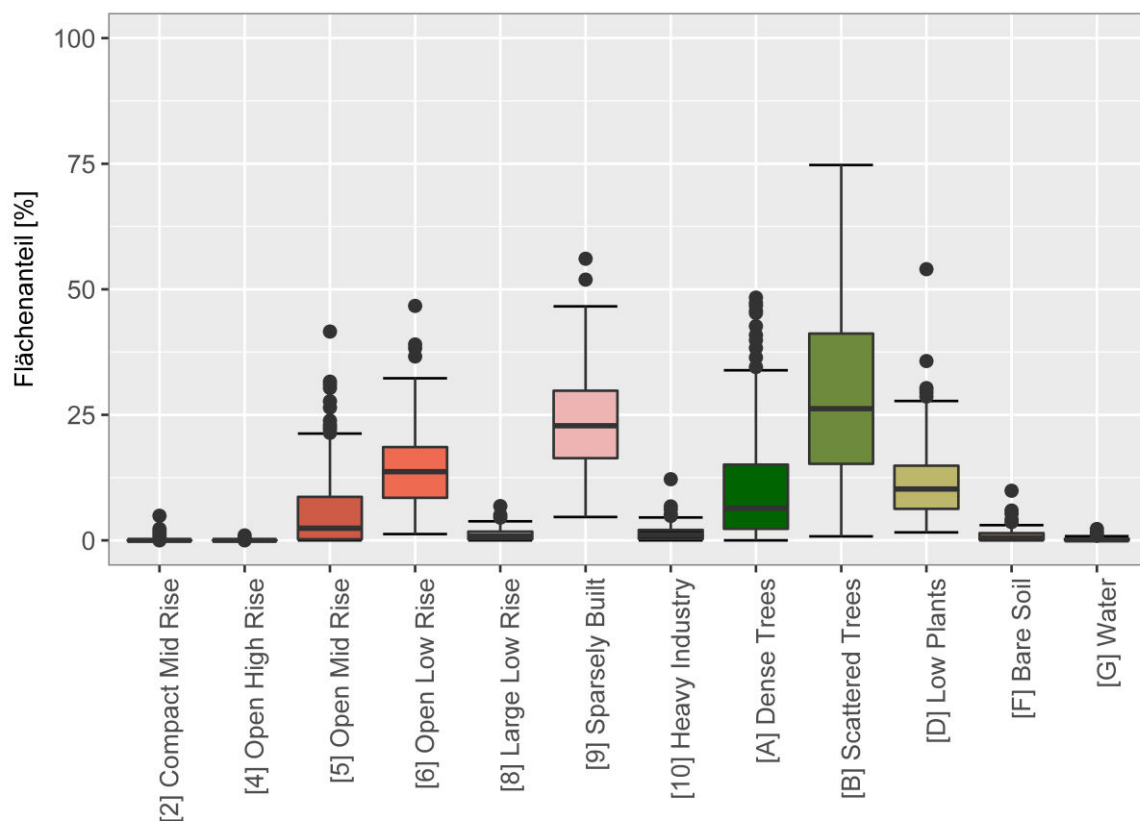
LCZ 4 (*Open high-rise*) stellt auch die geringste maximale Ausprägung mit 1,00% in Düsseldorf. Den maximalen Anteil einer LCZ überhaupt besitzt LCZ B (*Scattered trees*) mit 74,73% in Bad Berleburg.

Die meisten LCZs erreichen globale Minima von <1%. Ausnahmen hierbei sind LCZ 6 (*Open low-rise*) mit einem Minimum von 1,27%, LCZ 9 (*Sparsely built*) mit einem Minimum von 4,66% und LCZ D (*Low plants*) mit einem Minimum von 1,59%.

Wie aus Abbildung 3 ersichtlich, weisen alle LCZs eine rechtsschiefe Verteilung ( $skew > 0$ ) auf. Diese ist in der Regel bei den selteneren LCZs wie 2, 4 und F sehr ausgeprägt. Diese weisen auch deutliche Unterschiede zwischen Mittelwert und Median auf. Dies liegt daran, dass diese LCZs in vielen Gemeinden gar nicht aufgefunden wurden. Für diese seltenen LCZs ist auch der Variationskoeffizient im Vergleich mit den anderen Klassen sehr hoch.

Umgekehrt weisen die häufigen LCZs 6, 9 und B auch die geringsten Werte für Schiefe auf, und nur geringe Differenzen zwischen Mittelwert und Median.

Ausreißer gibt es bei der Verteilung der LCZs ausnahmslos nach oben. Insbesondere für LCZ 2, 5, A und F ist eine hohe Anzahl an Ausreißern ersichtlich.



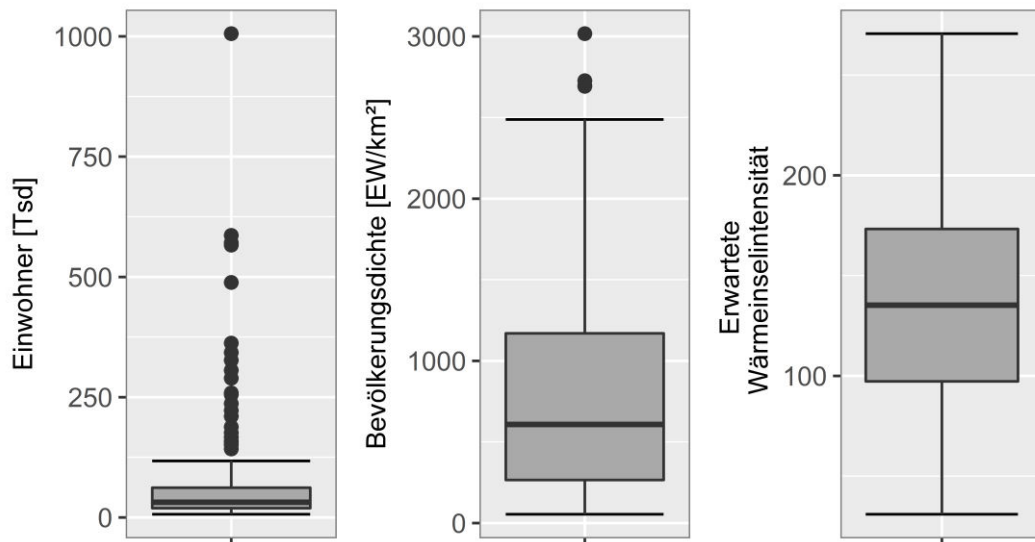
**Abbildung 3: Verteilung der Flächenanteile der LCZs über alle Gemeinden**

Die Betrachtung der Einwohnerzahlen (Abbildung 4) zeigt, dass auch hier eine ausgeprägte Rechtsschiefe vorliegt. In den 20 größten der 177 Gemeinden leben ca. 6.900.000 der 12.726.348 Menschen, was einem Anteil von ca. 54% entspricht.

**Tabelle 5: Lage- und Verteilungswerte für die LCZs über alle Gemeinden (Mean=Arithmetisches Mittel, Stdev=Standardabweichung, VarKo=Variationskoeffizient, Skew=Schiefe)**

	2	4	5	6	8	9	10	A	B	D	F	G
Mean	0,15	<b>0,01</b>	5,85	14,07	1,12	23,31	1,47	10,83	<b>30,22</b>	11,72	0,98	0,26
Median	0,00	0,00	2,42	13,69	0,86	22,81	1,14	6,39	26,24	10,21	0,51	0,10
Max	4,90	<b>1,00</b>	41,57	46,69	6,81	56,09	12,20	48,33	<b>74,73</b>	53,99	9,89	2,26
Min	0,00	0,00	0,00	1,27	0,00	4,66	0,00	0,00	0,81	1,59	0,00	0,00
Stdev	0,51	0,09	7,84	8,25	1,09	10,20	1,55	11,77	18,39	7,55	1,26	0,41
VarKo	3,45	6,27	1,34	0,59	0,98	0,44	1,06	1,09	0,61	0,64	1,29	1,54
Skew	6,04	9,19	1,86	0,88	1,77	0,34	2,68	1,54	0,69	1,82	3,04	2,22

Die Verteilung der erwarteten Wärmeinselintensität ist fast symmetrisch mit einer Schiefe von <0,1 und einem Variationskoeffizienten von 0,39 (vgl. Tabelle 6). Dabei muss berücksichtigt werden, dass es sich hierbei um einen dimensionslosen Index handelt, ähnlich einer Intervallskala.



**Abbildung 4: Verteilung von Einwohnerzahl, Bevölkerungsdichte und Erwarteter Wärmeinselintensität über alle Gemeinden**

**Tabelle 6: Lage- und Verteilungsmaße für Einwohnerzahl, Bevölkerungsdichte und Erwartete Wärmeinselintensität über alle Gemeinden (Mean=Arithmetisches Mittel, Stdev=Standardabweichung, VarKo=Variationskoeffizient, Skew=Schiefe)**

	Einwohner [Tsd.]	Bevölkerungsdichte	Erwartete Wärmeinselinten- sität
Mean	73,99	803,59	136,51
Median	31,63	607,27	135,28
Max	1005,78	3017,35	270,66
Min	6,72	54,41	31,04
Stdev	123,66	661,03	52,99
VarKo	1,67	0,82	0,39
Skew	4,23	1,17	-0,01

Die Maximale Erwartete Wärmeinselintensität besitzt die Gemeinde Herne, welche sich auch durch die höchste Bevölkerungsdichte aller Gemeinden NRWs hervorhebt (vgl. Tabelle 7). Die wärmsten Gemeinden zeichnen sich durch hohe Einwohnerzahlen und Bevölkerungsdichten aus, was sich auch in ihrer LCZ Verteilung niederschlägt: LCZs 2, 4 und 5 sind hier stark überdurchschnittlich oft vorhanden. Die lockeren Siedlungstypen LCZs 6 und 9 sind durchschnittlich oft vertreten. Stark unterdurchschnittlich vertreten sind LCZs B und D.

**Tabelle 7: Profile der fünf Gemeinden mit der höchsten Erwarteten Wärmeinselintensität (UHI Risk)**

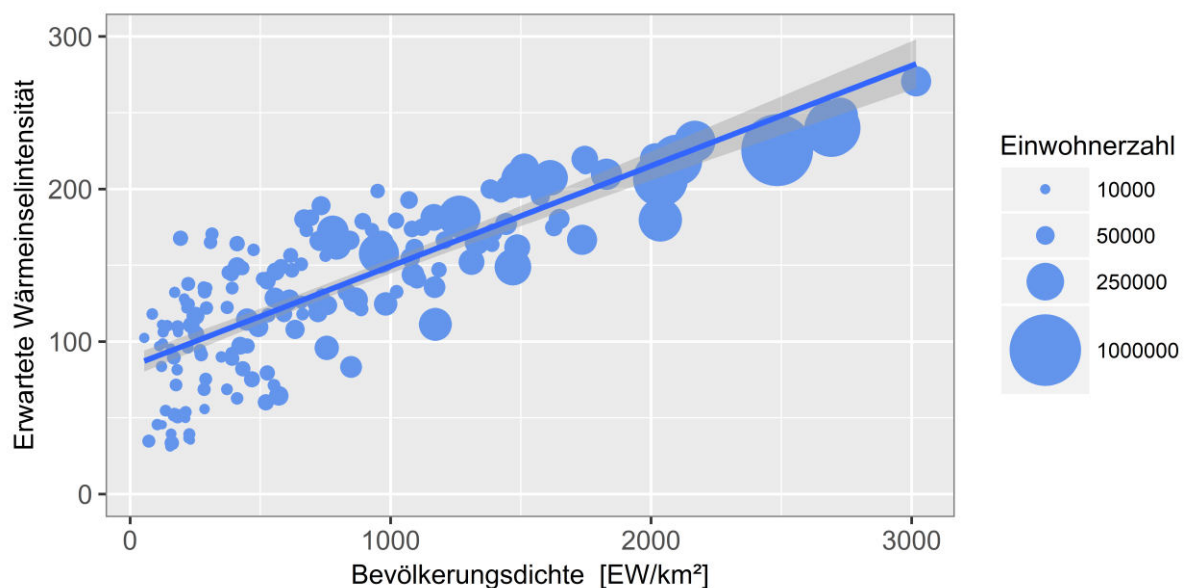
	2	4	5	6	8	9	10	A	B	D	F	G	UHI Risk
Herne	0,29	0,07	41,57	12,31	1,24	26,32	2,32	<b>1,14</b>	<b>11,45</b>	2,02	0,02	1,24	<b>270,66</b>
Oberhausen	2,28	0,11	27,70	17,55	0,89	24,55	3,20	9,89	8,67	3,47	0,10	1,59	248,56
Düsseldorf	1,60	<b>1,00</b>	31,62	8,67	1,80	21,81	2,78	9,95	15,30	4,03	0,37	1,07	240,01
Essen	0,75	0,61	31,06	10,82	0,67	30,84	1,08	3,28	17,49	2,74	0,08	0,57	238,96
Bochum	0,55	0,11	22,98	18,82	1,85	36,59	1,27	1,53	12,21	3,80	0,16	0,15	234,61

Bei der Betrachtung der kühlestn Gemeinden (Tabelle 8) kehren sich die oben genannten Auffälligkeiten ins Gegenteil um: Hier finden sich große Anteile an LCZs A und B wie im Fall von Breckerfeld, Bad Berleburg und Nachrodt-Wiblingwerde oder an LCZ D, wie im Fall von Hamminkeln.

**Tabelle 8: Profile der fünf Gemeinden mit der niedrigsten Erwarteten Wärmeinselintensität (UHI Risk)**

	2	4	5	6	8	9	10	A	B	D	F	G	UHI Risk
Breckerfeld	0,00	0,00	0,00	3,02	0,04	10,62	0,00	0,00	70,70	14,21	1,41	0,01	<b>31,04</b>
Hamminkeln	0,00	0,00	0,00	3,22	0,10	5,15	0,54	6,96	28,50	<b>53,99</b>	1,54	0,00	33,52
Bad Berleburg	0,00	0,00	0,04	1,27	0,03	4,66	0,01	11,05	<b>74,73</b>	8,16	0,03	0,01	34,71
Nachrodt-Wiblingwerde	0,00	0,00	0,00	3,99	0,02	11,11	0,13	0,36	69,27	14,80	0,33	0,00	35,29
Neuenrade	0,00	0,00	0,00	5,26	0,07	7,03	0,02	4,29	61,13	21,61	0,59	0,00	36,67

Vergleicht man die Bevölkerungsdichte und die zu erwartende Wärmeinselintensität (siehe Abbildung 5) ist ein positiver linearer Zusammenhang zu erkennen (*Steigungswert*). Der Korrelationskoeffizient dieser Parameter beträgt 0,82.



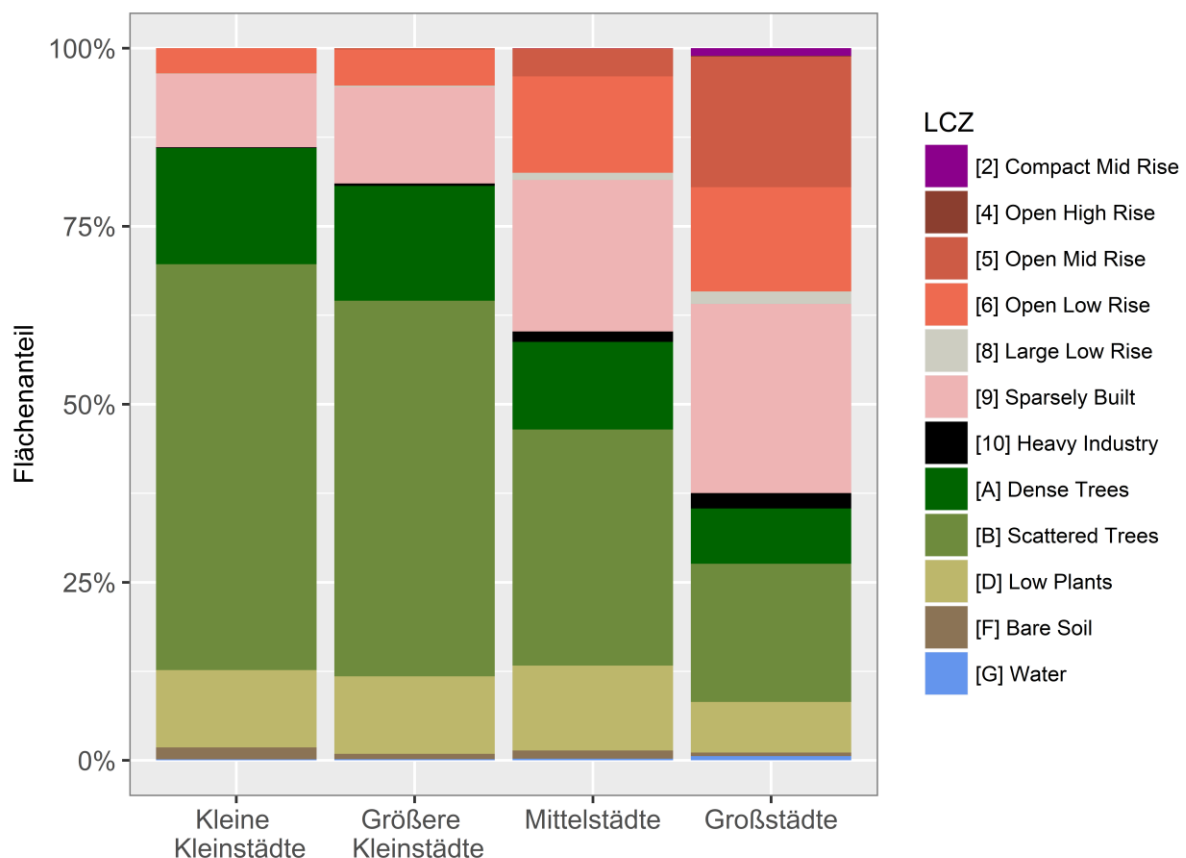
**Abbildung 5: Streudiagramm mit Regressionslinie von Bevölkerungsdichte gegen Einwohnerzahl. Die Größe der Punkte stellt die Einwohnerzahl der Gemeinden dar. In Grau der 95%-Vertrauensbereich,**

### 3.2 LCZ Verteilung nach Gemeindetypen

Die Einteilung nach den Stadt- und Gemeindetypen des BBSR ergab die Kategorien kleine Kleinstädte (n = 8), größere Kleinstädte (n = 38), Mittelstädte (n = 97) und Großstädte (n = 29)(s. Abbildung 6). Landgemeinden wurden durch die Beschränkung auf Gebiete innerhalb des EUAtlas eliminiert/ausgeschlossen.

Die Häufigkeitsreihenfolge der LCZ Klassen in den jeweiligen LCZ Profilen folgt im Großen und Ganzen dem globalen Durchschnitt (Tabelle 5). LCZ B ist der häufigste Typ der Oberflächenbedeckung und LCZ 9 ist der häufigste Bebauungstyp.

Bei den Kleinstädten machen die unbebauten LCZs (A-F) mit insgesamt über 80% der Gesamtfläche einen erheblich größeren Anteil aus als bei den Mittel- und Großstädten, wo speziell die offen bebauten LCZs 5 und 6 einen relativ großen Anteil der Fläche bedecken. Insbesondere bei den Großstädten ist bemerkenswert, dass mit LCZ 9 (*Sparsely built*) ein bebauter LCZ Typ einen größeren Anteil hat als LCZ B (*Scattered trees*).



**Abbildung 6: Relative LCZ Profile der BBSR Kategorien im Vergleich**

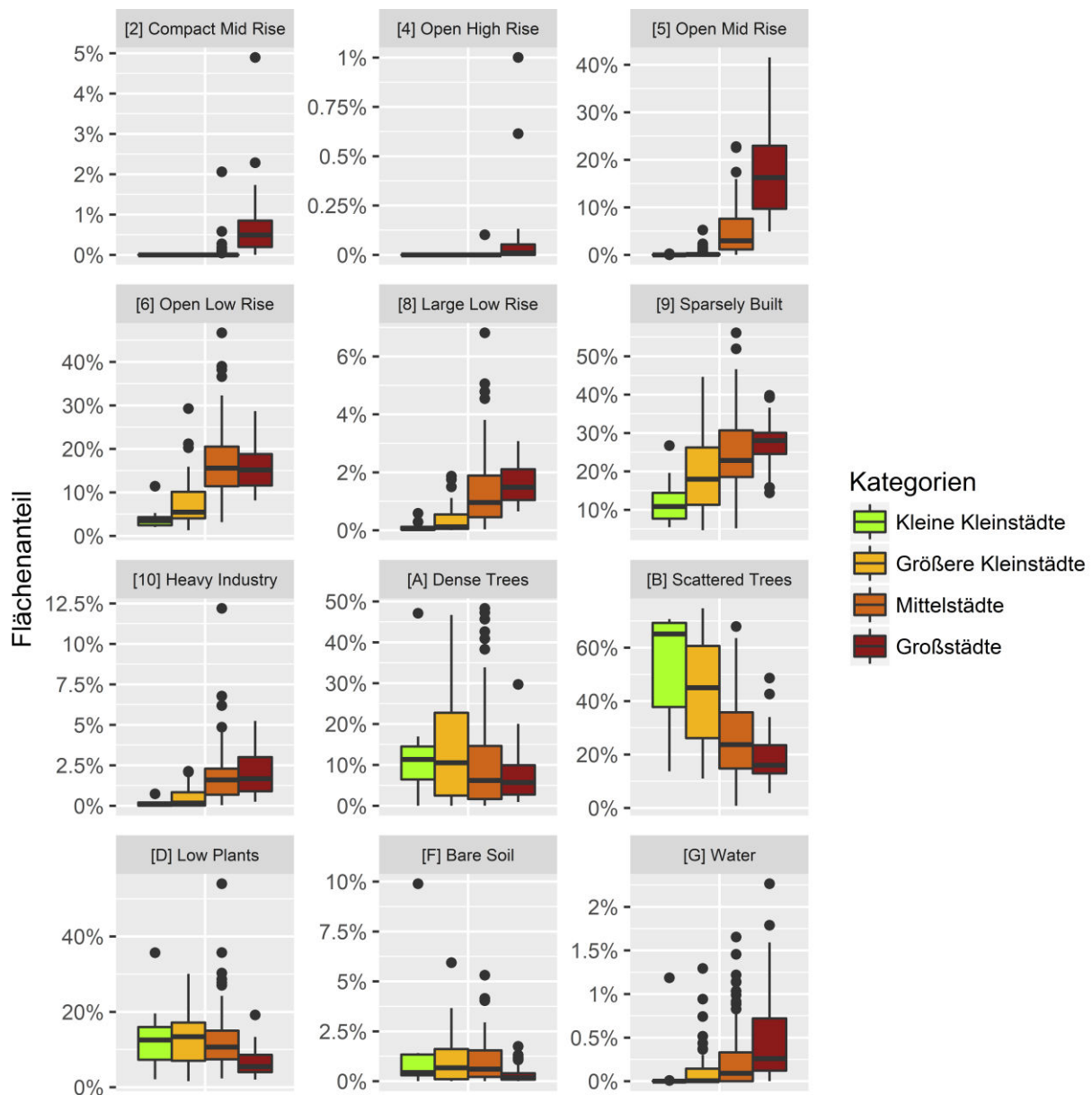
Abbildungen 6 und 7 zeigen die Verteilungen der LCZs in den verschiedenen Kategorien des BBSR.

Es zeigt sich, dass die Anteile der bebauten LCZs (2, 4,5,6,8,9 und 10) tendenziell mit der Gemeindegröße zunehmen (vgl. Tabelle 9). So finden sich die seltenen LCZs 2 und 4 in kleinen und größeren Kleinstädten gar nicht. Auch unter den Mittelstädten sind es lediglich



einige Ausreißer wie Siegburg, welche nennenswerte Anteile dieser LCZs aufweisen. Bei LCZ 5, welche bereits öfter in Kleinstädten auftaucht, macht sich ein Unterschied zwischen den Profilen kleiner (0,03%) und größerer Kleinstädte (0,41%) bemerkbar.

LCZ 6 unterscheidet sich dadurch von den anderen bebauten LCZs dadurch, dass hier in Mittelstädten (16,86%) leicht höhere Werte auftreten als in Großstädten (15,57%). Auffällig sind die Ausreißer nach oben: Niederkassel liegt mit 46,69% weit über dem Median der Kategorie Mittelstädte (16,86%), Bönen liegt mit 29,29% weit über dem Median der Größeren Kleinstädte (7,87).



**Abbildung 7: Verteilung der LCZ Klassen, getrennt nach BBSR Kategorien**

Bei der Betrachtung von LCZs 8 und 9 fällt auf, dass hier im Schnitt die höchsten Werte bei den Großstädten liegen, die globalen Maxima jedoch von Ausreißern unter den Mittelstädten gestellt werden. Wesseling, eine Mittelstadt, hat mit 12,20% den bei weitem größten Wert für Heavy Industry, vor Niederkassel mit 6,77%.



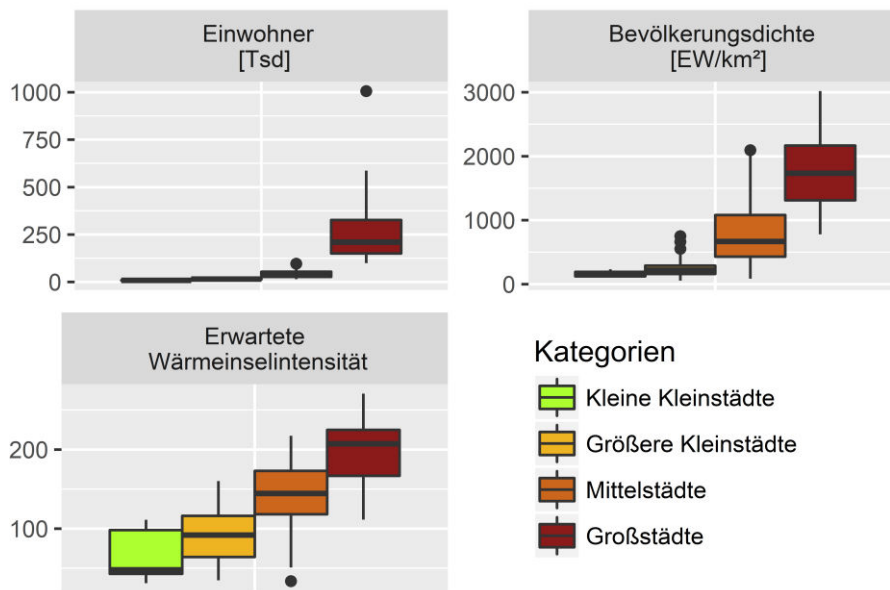
Bei den unbebauten LCZs bietet sich im Allgemeinen ein gegenteiliges Bild: Bei LCZ A zeigen sich weniger ausgeprägte Diskrepanzen zwischen den Durchschnittswerten der verschiedenen Kategorien. Kleine und Größere Kleinstädte liegen hier mit 13,66% und 14,20% vor den Mittelstädten (10,35%) und Großstädten (7,25%). Eine breite Streuung fällt bei größeren Kleinstädten und Mittelstädten auf, sowie die einzelnen Ausreißer bei kleinen Kleinstädten (Altenbeken 47,13%) und Großstädten (Bonn 29,71%). Weit weniger Ausreißer gibt es bei LCZ B, der häufigsten LCZ insgesamt. Bemerkenswert ist hier die starke Streuung und linksschiefe Verteilung bei kleinen Kleinstädten (Schiefe -1,08). LCZs D und F finden sich in Großstädten nur sehr selten, in allen anderen Stadttypen jedoch in einem ähnlichen Ausmaß.

Demgegenüber ist LCZ G eine Klasse, die bei den Großstädten (0,50%) am häufigsten vertreten und bei Kleinstädten (0,15%) seltener ist, und sich durch eine hohe Anzahl Ausreißer auszeichnet. Wasserreichste Gemeinden sind die Großstädte Duisburg (2,26%) und Köln (1,79%).

**Tabelle 9: ungewichtete LCZ Profile der erstellten Kategorien**

	2	4	5	6	8	9	10	A	B	D	F	G
Alle	0,15	<b>0,01</b>	5,85	14,07	1,12	23,31	1,47	10,83	<b>30,22</b>	11,72	0,98	0,26
Kleine Kleinstädte	0,00	0,00	0,03	4,28	0,14	12,58	0,17	13,66	<b>53,46</b>	13,78	1,75	0,15
Größere Kleinstädte	0,00	0,00	0,41	7,87	0,39	18,46	0,53	14,20	<b>43,59</b>	13,29	1,11	0,15
Mittelstädte	0,04	0,00	4,87	16,86	1,32	24,86	1,77	10,35	<b>26,21</b>	12,44	1,04	0,25
Großstädte	0,75	0,08	17,84	15,57	1,65	<b>27,47</b>	2,03	7,25	19,73	6,73	0,40	0,50
Kleine Gemeinden	0,02	0,00	2,15	12,91	0,87	22,24	1,12	12,52	33,56	13,40	1,02	0,19
Große Gemeinden	0,40	0,04	13,12	16,36	1,60	25,42	2,14	7,51	23,66	8,43	0,90	0,41
Dünn besiedelte Gemeinden	0,01	0,00	<b>1,99</b>	11,89	0,68	21,37	0,98	12,77	35,32	13,69	1,13	0,18
Dicht besiedelte Gemeinden	0,45	0,04	<b>14,29</b>	18,84	2,07	27,56	2,53	6,59	19,08	7,43	0,65	0,46

Bei der Verteilung der Erwarteten Wärmeinselintensität (vgl. Abbildung 8 und Tabelle 10) lassen sich klare Unterschiede zwischen den verschiedenen BBSR Klassen erkennen. Großstädte weisen im Mittel mit 197,58 die höchsten erwarteten Wärmewerte auf. Kühler sind die Mittelstädte (142,14) und die Größeren Kleinstädte (90,58). Am kühlgsten sind die Kleinen Kleinstädte mit durchschnittlich 65,06.



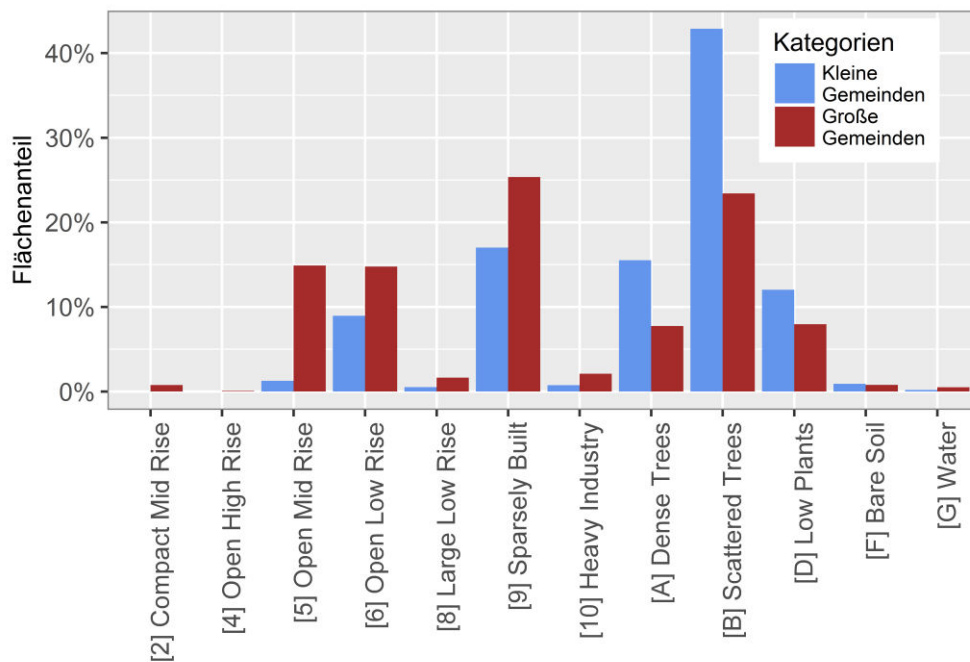
**Abbildung 8: Verteilung der Einwohnerzahl, Bevölkerungsdichte und Erwarteter Wärmeinselintensität, getrennt nach BBSR Kategorien**

**Tabelle 10: Lage- und Verteilungsmaße für die Erwartete Wärmeinselintensität der Kategorien**

	Max	Min	Mittel	Median	Schiefe
Alle Gemeinden	270,66	31,04	136,51	135,28	-0,01
Kleine Kleinstädte	111,12	31,04	65,06	48,00	<b>0,58</b>
Große Kleinstädte	160,17	34,71	90,58	91,83	0,10
Mittelstädte	217,30	33,52	142,14	144,47	<b>-0,40</b>
Großstädte	270,66	111,27	197,58	207,28	<b>-0,39</b>
Kleine Gemeinden	217,30	31,04	117,38	121,63	-0,09
Große Gemeinden	270,66	64,43	174,12	178,40	-0,24
Dünn besiedelte Gemeinden	198,75	31,04	112,03	117,58	-0,18
Dicht besiedelte Gemeinden	270,66	111,27	190,02	187,27	-0,02

Auffällig ist, dass die Kleinen Kleinstädte eine stark rechtsschiefe Verteilung aufweisen, während die der Großstädte und Mittelstädte eher linksschief ist.

Alles in allem finden sich für die Kategorie Mittelstädte die meisten Ausreißer. Die Anteile der unbebauten LCZs, insbesondere LCZ B, fallen mit zunehmender Stadtgröße ab, die Anteile der bebauten LCZs sowie die erwartete Wärmeinselintensität steigen an.

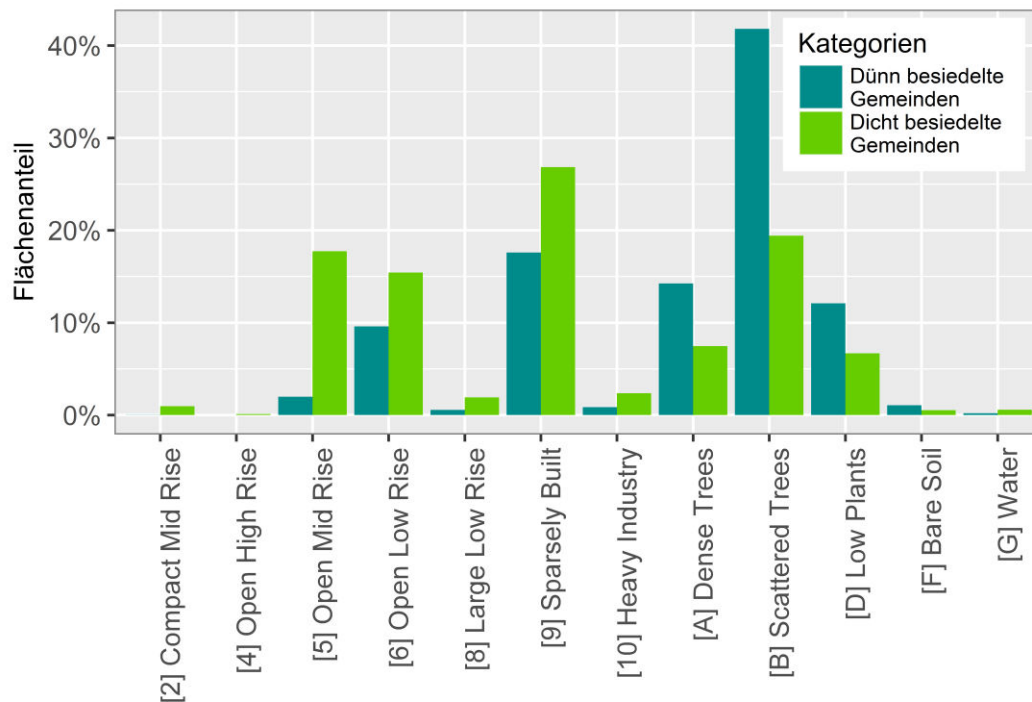


**Abbildung 9: LCZ Profile von Kleinen Gemeinden (<50000 EW) und Großen Gemeinden (>50000EW) im Vergleich**

Vergleicht man die Kategorien, welche anhand eines Bevölkerungsschwellwerts erstellt wurden (Abbildung 9), so zeigt sich, dass in Großen Gemeinden der Anteil der bebauten LCZs stark überwiegt, während die unbebauten LCZs in Kleinen Gemeinden überwiegen.

Relativ geringe Unterschiede gibt es bei den LCZs 6, 9, D und F. LCZ 9 beispielsweise macht bei Kleinen Gemeinden 22,24% aus, vergleichbar mit den 25,42% bei Großen Gemeinden. Die extremsten Unterschiede gibt es bei den kompakt bebauten LCZs 2,4 und 5, welche in Kleinen Gemeinden nur sehr selten auftauchen. So beträgt der Anteil von LCZ 5 bei kleinen Städten 2,15% und bei großen Städten 13,12% (vgl. Tabelle 9 und Abbildung 10).

Die mittlere erwartete Wärmeinselintensität beträgt 117,38 für die Gemeinden unter 50000 Einwohnern, und 174,12 für die größeren Gemeinden.



**Abbildung 10: LCZ Profile von dünn besiedelten Gemeinden ( $\leq 1000$  EW/km<sup>2</sup>) und dicht besiedelten Gemeinden ( $> 1000$  EW/km<sup>2</sup>) im Vergleich**

Die über einen Dichteschwellwert erstellten Kategorien zeigen im Großen und Ganzen ein ähnliches Bild wie die über einen Bevölkerungsschwellwert bestimmten Werte. Bemerkenswert ist, dass bei LCZ 6 die Differenz zwischen dicht- und dünnbesiedelten Gemeinden mit -6,95 Prozentpunkten deutlich stärker ausfällt als die Differenz zwischen großen und kleinen Gemeinden -3,45 (vgl. Abbildung 10).

Derselbe Effekt ist bei LCZ 9 zu beobachten, mit einer Differenz von -3,18 Prozentpunkten bei Kategorisierung nach Einwohnerzahl gegenüber einer Differenz von -6,19 Prozentpunkten bei einer Trennung nach Bevölkerungsdichte.

Auch die Differenz bei LCZ B ist bei einer Trennung nach Einwohnerzahl geringer (9,90) als bei der Trennung nach Dichte (16,24).

Die Erwartete Wärmeinselintensität beträgt 112,03 für die dünn besiedelten Gemeinden und 190,02 für die dichter besiedelten (vgl. Tabelle 10). Auch hier ist die Differenz zwischen den beiden Kategorien größer als bei der Aufteilung nach Einwohnerzahl.

## 4 Diskussion

### 4.1 Oberflächenstruktur der Siedlungen

Auch wenn Nordrhein-Westfalen als eine relativ dicht besiedelte Region bekannt ist, was einen hohen Anteil an dicht bebauten LCZ erwarten lässt, beträgt die Summe des Flächenanteils der dicht bebauten LCZs 2 (*Compact midrise*) und 5 (*Open midrise*) sowie der hohen LCZ 4 (*Open high-rise*) insgesamt nur etwa 6%. Die häufigste LCZ innerhalb der Gemeindegebiete ist LCZ B (*Scattered trees*) gefolgt von den locker bebauten LCZ 9 (*Sparsely built*) und 6 (*Open low-rise*).

Die seltensten LCZs sind demgegenüber LCZ 2, 4 sowie LCZ G (*Water*). Die Oberflächenstruktur der Städte Nordrhein-Westfalens lässt sich daher grob als großflächig locker bebaut und von bewaldeten Flächen durchzogen bezeichnen. Da keine vergleichbaren LCZ basierten Studien für andere Ballungsräume existieren, kann zu diesem Zeitpunkt keine weitere Bewertung erfolgen.

Die Analyse der klimatischen Resilienz zeigt, dass die wärmste Stadt im Untersuchungsgebiet Herne ist, welche sich dadurch auszeichnet, dass sie eine der höchsten Bevölkerungsdichten Deutschlands aufweist (WURM ET AL. 2015). WURM ET AL. führten 2015 eine Analyse der Dichteverteilung deutscher Großstädte durch und fanden, dass Herne sich nicht durch eine auffällig dichte Bebauung hervorhebt.

Die hohe Wärmeinselintensität von Herne lässt sich daher nicht ausschließlich durch eine hohe Bebauungsdichte erklären, sondern auch durch einen Mangel an ausgleichenden, kühleren Flächen. Herne weist selbst unter den Großstädten einen auffällig geringen Anteil der baumbedeckten LCZs A (*Dense trees*) und B (*Scattered trees*) auf.

Die kühlestn Gemeinden erreichen niedrige Werte der Erwarteten Wärmeinselintensität entweder durch hohe Anteile an LCZ D (beispielsweise Wiesen) wie im Fall von Hamminken, oder durch hohe Anteile an LCZs A und B (beispielsweise Wälder, Parks, Streuobstwiesen), wie im Falle von Breckerfeld oder Bad Berleburg.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der LCZ basieren Analyse eine klare Korrelation zwischen Bevölkerungsdichte und erwarteter Wärmeinselintensität. Auch die o.g. Studie von Taubenböck & Wurm fand einen klaren Zusammenhang zwischen der Einwohnerzahl von Städten und ihrer mittleren Dichte.

Die errechneten Temperaturwerte basieren auf der Annahme von Temperaturwerten, die unter idealen Bedingungen nach Sonnenuntergang gemessen wurden, und nicht den Tagesverlauf widerspiegeln. LEMONSU ET AL. (2015) fanden, dass kompakte Städte tagsüber tendenziell kühler sind als weitläufige Städte. Da sich in kompakten Städten jedoch auch ein Großteil ihrer Bevölkerung auf die besonders betroffenen Zonen konzentriert, wurde für diese die Vulnerabilität dennoch als höher eingeschätzt.

Die Betrachtung der BBSR Kategorien bestätigt, dass die LCZ Typen, welche auf eine dichtere Bevölkerungsverteilung hinweisen (LCZ 2, 4 und 5) in Kleinstädten nur sehr selten auftauchen und in Großstädten einen größeren Anteil ausmachen als in Mittelstädten.

In der Regel sind die Verteilungen rechtsschief, mit geringen Flächenanteilen der LCZs für die Mehrzahl der Gemeinden und einigen Ausreißern nach oben. Insbesondere bei den Mittelstädten finden sich viele Ausreißer und die größte Vielfalt in den LCZ Profilen. Ein Grund hierfür liegt in der Tatsache dass Mittelstädte die größte Kategorie darstellen.

Eine Ausnahme stellt LCZ B (*Scattered trees*) dar, welche bei Kleinen Kleinstädten eine ausgeprägt linksschiefe Verteilung aufweist. Dies ist dadurch begründet, dass in der nur 8 Gemeinden umfassenden Kategorie Nordkirchen mit einem sehr geringen Anteil (13,70%) an LCZ D (Low plants) stark ins Gewicht fällt.

Interessant ist, dass auch LCZ G (*Water*) in größeren Städten auch einen größeren Anteil an der Siedlungsfläche ausmacht. Durch die Nutzung des EUAtlas zur Beschneidung des Untersuchungsgebiets sollten grundsätzlich alle Wasserflächen (*Klasse 50000: Water*) entfernt werden (siehe Tabelle 2). Es ist daher anzunehmen, dass in großen Städten entweder eine größere Anzahl an Pixeln fälschlicherweise als LCZ G klassifiziert wurde oder dass die Beschneidung durch den EUAtlas nicht präzise genug war, um alle Wasserflächen zu entfernen, und große Städte tatsächlich einen größeren Anteil an Wasserflächen aufweisen.

Die Erstellung von Kategorien nach einem Bevölkerungs- und Bevölkerungsdichteschwellwert bestätigt zunächst die bereits erwähnten Tendenzen. Auffällig ist, dass die Aufteilung nach einem Bevölkerungsdichteschwellwert zu größeren Differenzen in der LCZ Verteilung und Wärmeinselintensität führt, als die Aufteilung nach einem Schwellwert der Einwohnerzahl. Dies legt nahe, dass die Oberflächenverteilung stärker im Zusammenhang mit der Bevölkerungsdichte der Gemeinde steht als mit ihrer gesamten Einwohnerzahl.

## 4.2 Geographische Verteilung der LCZ

In dieser Arbeit wurden die Flächenanteile der LCZs an dem Untersuchungsgebiet der Gemeinden berechnet und die Gemeinden anhand dieser Profile bewertet. Hierbei bleibt die räumliche Verteilung unberücksichtigt. Eine heterogene, stark durchmischte Verteilung von LCZs könnte jedoch durchaus einen anderen Effekt auf das Stadtklima haben als eine homogene Verteilung, bei der sich ähnliche LCZ nebeneinander befinden. Das Modell ist in dieser Hinsicht noch nicht ausreichend komplex.

In der o.g. Studie von Taubenböck & Wurm wurde eine Unterscheidung der inneren und äußeren Dichte der Städte vorgenommen. Dies zeigt, dass eine räumlich differenzierte Analyse der Morphologie grundsätzlich möglich ist. Im Rahmen dieser Arbeit konnte eine solche Analyse nicht vorgenommen werden, sie wird jedoch für künftige Studien empfohlen.

### 4.3 Begrenzung des Untersuchungsgebietes

Die Verschneidung der Gemeinden mit den ausgewählten Landnutzungsflächen des European Urban Atlas führte zu einer erfolgreichen Reduktion des Untersuchungsgebietes auf die Räume, welche eindeutig als Siedlungsfläche bezeichnet werden können. Es wurden durch die Beschneidung jedoch auch eventuelle Wasserflächen, Parks und Gärten entfernt, welche durchaus als Teil des Siedlungsgebietes angesehen werden können.

Es ist ein grundlegender Anspruch des Local Climate Zone Konzeptes, kulturneutral und global vergleichbar zu sein. Der Urban Atlas liegt jedoch nur für Europa vor. Eine Ausweitung der Methodik auf Untersuchungsgebiete in anderen Erdteilen wäre nicht ohne Änderungen möglich.

Des Weiteren steht der EUAtlas auch in Europa nur für Agglomerationen von über 100000 Einwohnern zur Verfügung (TAUBENBÖCK ET AL. 2015). Für ländliche Regionen müsste auf eine andere Landnutzungsklassifikation zurückgegriffen werden. Das in dieser Arbeit untersuchte NRW ist zu einem hohen Anteil im EUAtlas erfasst, jedoch nicht komplett.

Es muss ferner beachtet werden, dass der LCZ Datensatz und der EUAtlas Datensatz zwar beide aus Fernerkundungsdaten abgeleitet wurden, jedoch nicht aus denselben Datensätzen. Dem entsprechend ist auch der Zeitpunkt aus dem die Daten abgeleitet sind nicht identisch.

### 4.4 Auswirkungen der Bezugsfläche

In dieser Arbeit wurden Bezugsflächen auf Gemeindeebene genutzt. Dies erlaubt die unkomplizierte Verbindung mit Bevölkerungsstatistiken und erleichtert den Zugang zu den Ergebnissen. Es führt jedoch auch zu grundsätzlichen Problemen: Die Grenze einer Gemeinde ist erstens diskret, und zweitens ein politisches Konstrukt. Dies spiegelt nicht die Komplexität des Klimas wieder, welches sich durch kontinuierliche Phänomene auszeichnet, welche politische Grenzen überschreiten. Ein am Rand einer Gemeinde liegender Wald kann je nach den mesoklimatischen Bedingungen durchaus großen Einfluss auf das Klima einer Nachbargemeinde haben. Da in dieser Arbeit jedes LCZ Pixel nur einer Gemeinde zugeordnet wurde sind derartige Effekte nicht angemessen berücksichtigt. Eine Ausweitung auf ein komplexeres Modell, welches klimatische oder geographische Einheiten anstelle von politischen Einheiten verwendet wäre wünschenswert, war aber im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgesehen.

### 4.5 Temperaturen der LCZ

Bei der Verknüpfung der LCZs mit konkreten Temperaturwerten gibt es noch Verbesserungsbedarf, der sich hauptsächlich daraus aus dem Umstand ergibt, dass die große Mehrheit der das LCZ Konzept nutzenden stadtklimatischen Untersuchungen die Ausprägung des städtischen Wärmeinseleffektes in einem lokalen Umfang untersuchen.

Wie bereits erwähnt ist die Ausprägung des interzonalen Wärmeinseleffekts, definiert durch die Temperaturdifferenz zweier LCZs, am höchsten bei klaren, windstillen Nächten, etwa 4 Stunden nach Sonnenuntergang. Die meisten Studien weisen primär die unter diesen Umständen gemessenen Temperaturwerte aus. Unter weniger idealen Bedingungen sind die Temperaturdifferenzen weit weniger ausgeprägt. Teilweise können sie sich sogar umkehren: Simulationen von THEEUWES ET AL. (2015) deuten an, dass sich am Morgen für einige Zeit durch unterschiedliche Höhe der Luftschichten ein „Urban Cool Island“ ausbilden kann. Modellierungen von MIDDEL ET AL (2013) für den Raum Phoenix, USA, fanden ein ausgeprägtes „Cool Island“ für kompakte LCZs, welches sich durch Schattierung in Straßenschluchten ergab. Es ist daher wichtig sich bewusst zu sein, dass sich die in dieser Arbeit vorgenommenen Ergebnisse auf das nächtliche Temperaturregime der Städte beziehen.

Es lagen keine Studien vor, welche für alle 13 vorhandenen LCZs brauchbare Temperaturwerte bereitstellten. Es war daher eine Kombination der Ergebnisse mehrerer Studien notwendig, um eine Analyse der klimatischen Resilienz der Siedlungen vorzunehmen. Die ausgewählten Studien zeichneten sich zwar durch eine gute Dokumentation und hohe Qualitätssicherung aus, eine vollkommene Übereinstimmung in der Methodik war aber leider nicht vorhanden, was einen Schwachpunkt der Kombination ihrer Ergebnisse darstellt.

Selbst durch die Kombination mehrerer Studien konnten für 3 der 13 LCZ keine Werte gefunden werden. Dies ergibt sich aus dem geringen Anteil der LCZs 10 (*Heavy industry*), F (*Bare soil*) und G (*Water*) an den in den Studien untersuchten Siedlungsgebieten, welcher keine ausreichende Anzahl an Messpunkten unterstützt.

Des Weiteren sollte angemerkt werden, dass die in dieser Studie auf ein mitteleuropäisches Gebiet angewandten Temperaturwerte auch aus Studien in mitteleuropäischen Städten stammen. Es ist fraglich ob es vertretbar wäre, diese Werte auch auf Gebiete in anderen Erdteilen anzuwenden. Die LCZs sind zwar idealerweise kulturell neutral, dennoch wäre es zu untersuchen, ob LCZs unter anderen kulturellen und makroklimatischen Bedingungen andere Temperaturregimes ausbilden. Die in dieser Arbeit vorgenommene Auswertung von 12 Studien aus Asien, Europa und Nordamerika deutet an, dass die Rangordnung der Lufttemperatur der LCZs in der Regel über die Studien hinweg konstant bleibt, sich aber durchaus kulturbedingte Unterschiede ausbilden können. Ein Beispiel hierfür ist eine von Sakakibara und Matsui in der japanischen Stadt Nagano durchgeführten Studie, in der sich für LCZ D (*Low plants*) starke saisonale Schwankungen zeigen, welche durch die Flutung der Reisfelder bedingt sind (STEWART 2011). Wenn möglich, sollten daher auch in künftigen Untersuchungen die Ergebnisse lokaler Studien bevorzugt werden.

Es wäre dennoch wünschenswert, wenn stadtklimatische Studien in einem überregionalen und bestenfalls globalen Umfang durchgeführt werden.



## 5 Fazit

In dieser Arbeit wurde das von Stewart & Oke entwickelte Local Climate Zone Konzept genutzt, um die Oberflächenstruktur von Gemeinden in Nordrhein-Westfalen zu erfassen und zu vergleichen. Hierfür wurde auf einen bestehenden Datensatz aus einer vorangegangenen Studie, welcher die LCZs für einen Großteil Nordrhein-Westfalens erfasst, zurückgegriffen. Das Untersuchungsgebiet wurde mithilfe der Landnutzungsklassen des European Urban Atlas auf die Siedlungsflächen begrenzt und die LCZ sodann auf Gemeindeebene aggregiert. Damit wurde für jede Gemeinde ein LCZ-Profil erstellt.

Die Verknüpfung der LCZ-Profile mit auf LCZ bezogenen Temperaturwerten aus der Forschung ermöglichte die Berechnung der klimatischen Resilienz der Städte in Form einer erwarteten Wärmeinselintensität. Diese Verknüpfung wurde dadurch beeinträchtigt, dass für einige LCZs keine vergleichbaren Temperaturwerte vorlagen. Dennoch ergab dieser Teil der Analyse sinnvolle Ergebnisse und zeigte eine klare Korrelation zwischen Bevölkerungsdichte und erwarteter Wärmeinselintensität.

Die Gemeinden wurden zusätzlich in Kategorien eingeteilt. Dies geschah sowohl über ein Schwellwertverfahren nach Einwohnerzahl und Bevölkerungsdichte als auch nach einer bereits vorhandenen Klassifikation des BBSR.

Es zeigt sich, dass Gemeinden unterschiedlicher Größe auch unterschiedliche Ausprägungen ihrer LCZ-Verteilungen aufweisen. In der Regel besitzen größere Gemeinden höhere Anteile an den dichter bebauten LCZs 2 (*Compact midrise*), 4 (*open high-rise*) und 5 (*open midrise*) und geringere Anteile an den unbebauten LCZs A (*Dense trees*), B (*Scattered trees*) und D (*low plants*). Es besteht jedoch auch innerhalb der Kategorien teilweise eine große Vielfalt und einzelne Gemeinden heben sich durch ungewöhnlich hohe oder niedrige Werte in manchen LCZs von den restlichen Gemeinden ihrer Kategorie ab. Es wird erwartet, dass ein entscheidender Mehrwert der entwickelten Methodik in Zukunft darin bestehen kann, derartige Ausreißer zu identifizieren, und durch weitere Analyse ihrer besonderen Eigenschaften sowohl wissenschaftliche Erkenntnisse als auch politische Handlungsempfehlungen zu gewinnen.

Auch wurde belegt, dass es grundsätzlich möglich und sinnvoll ist, die LCZ basierten Oberflächenprofile mit LCZ bezogenen Forschungsdaten aus anderen Wissenschaftsbereichen zu vergleichen, so wie es in dieser Arbeit mit den stadtklimatischen Temperaturdaten geschehen ist. Ein Mangel an LCZ basierter Forschung schränkt die Anwendbarkeit momentan noch ein.

Die in dieser Arbeit genutzte Methodik lässt sich zwar prinzipiell auf Untersuchungsgebiete der ganzen Welt anwenden, die genutzten Eingangsdaten liegen jedoch in der Form nicht weltweit vor. Speziell der European Urban Atlas ist auf Agglomerationen Europas beschränkt, und gleichartig erstellte LCZ Datensätze existieren nur für wenige urbane Regionen.

Das Local Climate Zone Konzept kann jedoch durch seine kulturneutrale Natur auf der ganzen Welt angewandt werden. Fortschritte in der Fernerkundung und Geoinformatik, speziell in der Einbindung von Verfahren des Maschinellen Lernens, lassen hoffen, dass es in naher Zukunft möglich sein wird, die notwendigen Daten in einem globalen Umfang und mit einer einheitlichen Methodik zu erfassen. Damit wäre die Grundlage für einen Vergleich der Siedlungsstruktur aller Städte der Welt geschaffen, und ein Rahmen für eine multi-disziplinäre urbane Geographie.

Dies wäre ein entscheidender Schritt zur Entwicklung von neuen, nachhaltigen Stadtkonzepten welche für die Bewältigung der kommenden Herausforderungen unabdingbar sein werden.

## VI Literatur- und Quellenverzeichnis

- BEZIRKSREGIERUNG KÖLN (2016): Unser NRW - Nordrhein-Westfalen in Zahlen und Geodaten.  
[http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk\\_internet/nrw-zahlen-geodaten/index.html](http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/nrw-zahlen-geodaten/index.html)  
Zugegriffen 3.12.2017.
- B. BECHTEL, P. J. ALEXANDER, J. BÖHNER, J. CHING, O. CONRAD, J. FEDDEMA, G. MILLS, L. SEE, I. STEWART (2015): Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities *Journal of Geo-Information* 4(1), 199–219.
- B R. BRUNET (1989): Les villes européennes: Rapport pour la DATAR. Montpellier, 79 S.
- C Y. CHEN, T. LIN, W. SHIH (2017): Modeling the urban thermal environment distributions in Taipei Basin using Local Climate Zone (LCZ). In *Urban Remote Sensing Event (JURSE), 2017 Joint*, 1–4.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR ENTWICKLUNGSPOLITIK (2017): Urbanisierung und Habitat III.  
<https://www.die-gdi.de/urbanisierung-und-habitat-iii/>  
Zugegriffen 30. November 2017.
- M. WURM, H. TAUBENBÖCK (2015): Die Morphologie deutscher Großstädte: Was die Dichte über die Struktur der Städte verrät. In: Taubenböck, Hannes, Michael Wurm, Thomas Esch, und Stefan Dech (Hrsg.), *Globale Urbanisierung*. Berlin Heidelberg, S.127-133.
- T. ESCH, A. FELBIER, H. TAUBENBÖCK, M. WURM, S. DECH (2015): Die Globale Vielfalt Urbaner Siedlungsmuster. In: Taubenböck, Hannes, Michael Wurm, Thomas Esch, und Stefan Dech (Hrsg.), *Globale Urbanisierung*. Berlin Heidelberg, S.42-48.
- D. FENNER, F. MEIER, B. BECHTEL, M. OTTO, D. SCHERER (2017): Intra and inter 'local climate zone variability of air temperature as observed by crowdsourced citizen weather stations in Berlin, Germany. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol 26, 5,525-527.
- T. GÁL, B. BECHTEL, J. UNGER (2015): Comparison of two different Local Climate Zone mapping methods.
- GEOSPATIAL DATA ABSTRACTION LIBRARY (GDAL): GDAL. <http://www.gdal.org/>.  
Zugegriffen 3.12.2017.
- J. GELETIC, P. DOBROVOLNÝ, M. LEHNERT (2017): Statistical analyses of land surface temperature in local climate zones: Case study of Brno and Prague (Czech Republic) In: *Urban Remote Sensing Event (JURSE), 2017 Joint*, 1–4.
- R. GLASER, H. GEBHARDT, W. SCHENK (2007): *Geographie Deutschlands*. Darmstadt, S.149.ff.
- R. J. HIJMANS (2017): Raster Package.  
<https://cran.revolutionanalytics.com/web/packages/raster/raster.pdf>.  
Zugegriffen 14.12.17.

- INFORMATION UND TECHNIK NORDRHEIN-WESTFALEN (2017): Geografische Angaben zum Land Nordrhein-Westfalen. [https://www.it.nrw.de/statistik/img\\_tabellen/r522geo1\\_tab.html](https://www.it.nrw.de/statistik/img_tabellen/r522geo1_tab.html). Zugriffen 5.12.2017.
- J. T. D. JORGENSEN (2016): SemTools Package. <https://cran.r-project.org/web/packages/semTools/semTools.pdf>. Zugriffen 11.12.17.
- M. KLOTZ, M. WURM, H. TAUBENBÖCK (2015): Der Werkzeugkasten der urbanen Fernerkundung –Daten und Produkte.In: Taubenböck, Hannes, Michael Wurm, Thomas Esch, und Stefan Dech (Hrsg.), Globale Urbanisierung. Berlin Heidelberg, S.30-38.
- E. LELOVICS, J. UNGER, T. GÁL, C. V. GÁL (2014): Design of an urban monitoring network based on Local Climate Zone mapping and temperature pattern modelling. *Climate Research* 61(1), 51–62.
- A. LEMONSU., V. VIGUIÉ, M. DANIEL, V. MASSON (2015):Vulnerability to Heat Waves: Impact of Urban Expansion Scenarios on Urban Heat Island and Heat Stress in Paris (France). In: *Urban Climate* 14, 586–605.
- F. LECONTER, J. BOUYER, R. CLAVERIE, M. PÉTRISSANS (2015): Using Local Climate Zone Scheme for UHI Assessment: Evaluation of the Method Using Mobile Measurements. In: *Building and Environment*, Band 83, 39–49.
- F. LECONTER, J. BOUYER, R. CLAVERIE, M. PÉTRISSANS (2017):Analysis of nocturnal air temperature in districts using mobile measurements and a cooling indicator. In: *Theoretical and Applied Climatology*, Band 130, Ausgabe 1-2, 365-376.
- A. MIDDEL, K. HÄB, A. J. BRAZEL, C. A .MARTIN, S. GUHATHAKURTA (2014): Impact of Urban Form and Design on Mid-Afternoon Microclimate in Phoenix Local Climate Zones. In: *Landscape and Urban Planning* 122, 16-28.
- A. PONCET, G. MOSER, H. TAUBENBÖCK, M. WURM, D. TUIA (2015): Classification of urban structural types with multisource data and structured models. In: *Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, 2015 Joint, 1–4.
- M. POUMADÈRE, C. MAYS, S. LE MER, R BLONQ (2005): The 2003 heat wave in France: dangerous climate change here and now." In: *Risk analysis* 25.6 (2005): 1483-1494.
- D. SCHERER, U. FEHRENBACH, T. LAKES, S. LAUF, F MEIER, C. SCHUSTER (2014):Quantification of heat-stress related mortality hazard, vulnerability and risk in Berlin, Germany. In: *DIE ERDE–Journal of the Geographical Society of Berlin* 144, Nr. 3–4: 238–259.
- STATISTA (2017): Median. <https://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/85/median/>. Zugriffen 22.12.2017.

- I. D. STEWART, T. R. OKE (2012): Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93, Nr. 12, 1879–1900.
- I.D.STEWART (2011): Redefining the urban heat island. Dissertation an der University of British Columbia.
- H. TAUBENBÖCK, M. WURM, T. ESCH, S. DECH (2015): Globale Urbanisierung - Perspektive aus dem All. Berlin, Heidelberg.
- N. THEUWES, G. STEENEVELD, R. J. RONDA, M. W. ROTACH, A. A. M. HOLTSLAG (2015): Cool city mornings by urban heat. In: *Environmental Research Letters* 10, Nr. 11.
- D. TUIA, G. MOSER, M. WURM, H. TAUBENBÖCK (2017): Land use modeling in North Rhine-Westphalia with interaction and scaling laws. In: *Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, 2017 Joint, 1–4.
- UNITED NATIONS (2017): United Nations Sustainable Development- Cities. Zuletzt eingesehen 15.12.2017. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/cities>.
- M. WURM, H. TAUBENBOCK, A. ROTH, S. DECH (2009): Urban structuring using multisensoral remote sensing data: By the example of the German cities Cologne and Dresden. In: *Urban Remote Sensing Event*, 2009 Joint, 1–8.
- M.WURM, H. TAUBENBÖCK, M. SCHARDT, T. ESCH, S. DECH (2011): Object-Based Image Information Fusion Using Multisensor Earth Observation Data over Urban Areas. In: *International Journal of Image and Data Fusion* 2, Nr. 2 (Juni 2011): 121–47.
- WEISSTEIN, ERIC W. „Skewness“. <http://mathworld.wolfram.com/Skewness.html>. Zugegriffen 13.12.2017.
- ŽUVELA-ALOISE (2017): Enhancement of Urban Heat Load through Social Inequalities on an Example of a Fictional City King's Landing. In: *International Journal of Biometeorology* 61, Nr. 3, 527–39.

## VII Geodatenverzeichnis:

**DVG2.** BEZIRKSREGIERUNG KÖLN (2016): Digitale Verwaltungsgrenzen. Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0. Abrufbar unter: [http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk\\_internet/geobasis/topographie\\_sonderkarten/verwaltungsgrenzen/index.html](http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/topographie_sonderkarten/verwaltungsgrenzen/index.html)

**LCZ NRW.** DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT – DEUTSCHES FERNERKUNDUNGSDATENZENTRUM (DLR-DFD) (2017): Local Climate Zone Datensatz Nordrhein-Westfalen.

**Urban Atlas 2012.** EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA) UNDER THE FRAMEWORK OF THE COPERNICUS PROGRAMME (2006): European Urban Atlas 2012. Abrufbar unter: <http://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/urban-atlas-2012?tab=download>

## VIII Datenquellenverzeichnis:

### Sekundärdaten:

BUNDESINSTITUT FÜR BAU- STADT- UND RAUMFORSCHUNG (BBSR) : Stadt- und Gemeindetyp. [https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumbeobachtung/Raumabgrenzungen/StadtGemeindetyp/StadtGemeindetyp\\_node.html](https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumbeobachtung/Raumabgrenzungen/StadtGemeindetyp/StadtGemeindetyp_node.html)  
Eingesehen am: 30. November 2017.

D. FENNER, F. MEIER, B. BECHTEL, M. OTTO, D. SCHERER (2017): Intra and inter 'local climate zone' variability of air temperature as observed by crowdsourced citizen weather stations in Berlin, Germany. Meteorologische Zeitschrift, Vol 26, 5,525-527-

IT NRW-GESCHÄFTSBEREICH STATISTIK: Zensus 2011. Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0"  
Eingesehen am: 04.10.2017. <https://www.it.nrw.de/statistik/a/index.html>.

F. LECONTER, J. BOUYER, R. CLAVERIE, M. PÉTRISSANS (2015): Using Local Climate Zone Scheme for UHI Assessment: Evaluation of the Method Using Mobile Measurements. In: Building and Environment, Band 83, 39–49.

F. LECONTER, J. BOUYER, R. CLAVERIE, M. PÉTRISSANS (2017): Analysis of nocturnal air temperature in districts using mobile measurements and a cooling indicator. In: Theoretical and Applied Climatology, Band 130, Ausgabe 1-2, 365-376.

## IX Anhang













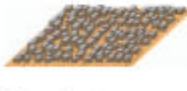




Built types	Definition	Land cover types	Definition
1. Compact high-rise 	Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	A. Dense trees 	Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
2. Compact midrise 	Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	B. Scattered trees 	Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
3. Compact low-rise 	Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	C. Bush, scrub 	Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture.
4. Open high-rise 	Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	D. Low plants 	Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park.
5. Open midrise 	Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	E. Bare rock or paved 	Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.
6. Open low-rise 	Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.	F. Bare soil or sand 	Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture.
7. Lightweight low-rise 	Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).	G. Water 	Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.
8. Large low-rise 	Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials.	<b>VARIABLE LAND COVER PROPERTIES</b>	
9. Sparsely built 	Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees).	Variable or ephemeral land cover properties that change significantly with synoptic weather patterns, agricultural practices, and/or seasonal cycles.	
10. Heavy industry 	Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.	b. bare trees	Leafless deciduous trees (e.g., winter). Increased sky view factor. Reduced albedo.
		s. snow cover	Snow cover >10 cm in depth. Low admittance. High albedo.
		d. dry ground	Parched soil. Low admittance. Large Bowen ratio. Increased albedo.
		w. wet ground	Waterlogged soil. High admittance. Small Bowen ratio. Reduced albedo.

Abbildung 11: Übersicht über die Local Climate Zone Klassen. I. D. Stewart, T. R. Oke (2012): Local climate zones for urban temperature studies. Bulletin of the American Meteorological Society 93, Nr. 12, 1879–1900.

**Tabelle 11: LCZ Profile und erwartete Wärmeinselintensität aller Gemeinden. (2=Compact midrise, 4= Open high-rise, 5= Open midrise, 6= Open low-rise, 8=Large low-rise, 9=Sparsely built, 10=Heavy industry, A=Dense trees, B= Scattered trees, D= Low plants, F= Bare soil, G= Water, UHIRisk = Erwartete Wärmeinselintensität**

	2	4	5	6	8	9	10	A	B	D	F	G	UHI Risk
Aachen	0,72	0,02	11,04	10,93	1,05	29,74	1,75	0,92	33,99	9,66	0,00	0,19	148,85
Alfter	0,00	0,00	1,32	10,07	1,07	15,05	2,33	42,66	19,95	7,15	0,40	0,00	150,69
Alpen	0,00	0,00	0,00	8,02	0,07	44,62	0,30	3,34	25,06	17,49	1,00	0,10	125,75
Alsdorf	0,00	0,00	6,89	28,38	1,99	42,82	2,09	0,29	8,19	9,27	0,08	0,00	201,21
Altena	0,00	0,00	0,08	5,33	0,09	21,51	0,39	0,44	64,09	6,39	1,68	0,00	62,75
Altenbeken	0,00	0,00	0,00	3,91	0,00	5,45	0,01	47,13	38,33	4,96	0,20	0,00	111,12
Ascheberg	0,00	0,00	0,10	10,01	0,41	21,37	2,09	17,88	15,03	30,09	3,02	0,00	110,31
Bad Berleburg	0,00	0,00	0,04	1,27	0,03	4,66	0,01	11,05	74,73	8,16	0,03	0,01	34,71
Bad Honnef	0,00	0,00	0,99	10,78	0,17	8,78	0,79	47,29	28,20	2,65	0,32	0,03	141,03
Bad Laasphe	0,00	0,00	0,00	2,14	0,07	5,47	0,01	14,75	71,24	6,26	0,01	0,06	45,55
Bad Lippspringe	0,00	0,00	1,75	8,49	0,02	8,39	0,00	46,72	27,43	5,88	1,31	0,00	135,15
Baesweiler	0,00	0,00	3,14	36,62	1,22	42,00	0,58	0,00	6,92	9,47	0,05	0,00	198,75
Balve	0,00	0,00	0,00	4,87	0,08	8,22	0,03	4,78	61,67	19,65	0,69	0,00	39,38
Bedburg	0,00	0,00	1,13	24,54	0,77	27,65	1,89	1,29	17,20	23,32	1,52	0,68	132,64
Bergheim	0,00	0,00	8,70	15,66	0,99	20,78	1,86	1,18	28,80	17,53	4,15	0,35	127,62
Bergisch Gladbach	0,01	0,00	5,70	18,39	1,38	24,77	0,29	13,11	32,29	3,97	0,03	0,05	152,12
Bergkamen	0,00	0,00	2,52	29,46	1,51	27,40	2,18	6,13	18,19	10,65	1,44	0,53	161,27
Bielefeld	0,22	0,00	10,64	19,68	1,07	30,08	0,46	9,93	23,49	4,19	0,23	0,01	181,77
Billerbeck	0,00	0,00	1,44	7,50	0,90	28,83	0,84	3,57	34,25	16,73	5,94	0,00	98,74
Bochum	0,55	0,11	22,98	18,82	1,85	36,59	1,27	1,53	12,21	3,80	0,16	0,15	234,61
Bönen	0,00	0,00	0,30	29,29	1,50	33,75	0,98	4,08	11,41	16,77	1,91	0,00	160,17
Bonn	1,73	0,00	21,41	15,18	2,61	14,44	1,61	29,71	8,32	4,74	0,11	0,14	231,31
Borchen	0,00	0,00	0,12	10,17	0,18	13,89	0,16	39,86	23,98	9,32	2,34	0,00	132,30
Bornheim	0,00	0,00	1,44	16,78	2,40	17,76	2,39	26,25	19,72	11,31	1,55	0,39	145,92
Bottrop	0,34	0,04	9,29	14,73	0,97	27,01	3,25	20,04	17,74	5,41	0,85	0,32	181,40
Breckerfeld	0,00	0,00	0,00	3,02	0,04	10,62	0,00	0,00	70,70	14,21	1,41	0,01	31,04
Brühl	0,00	0,00	10,63	12,10	1,83	14,85	4,47	25,57	23,68	3,64	1,76	1,46	166,40
Burbach	0,00	0,00	0,02	5,42	0,11	5,50	0,12	34,53	50,39	3,78	0,08	0,05	91,45
Büren	0,00	0,00	0,12	4,49	0,11	8,82	0,05	45,68	33,08	6,12	1,54	0,00	118,09
Burscheid	0,00	0,00	1,16	15,56	0,88	32,56	0,51	0,00	40,35	8,97	0,00	0,00	117,95
Castrop-Rauxel	0,00	0,00	11,54	20,52	1,42	26,90	2,33	6,70	18,65	10,31	1,31	0,31	177,04
Coesfeld	0,00	0,00	2,13	11,84	0,84	20,68	0,80	9,57	35,79	16,95	1,38	0,00	105,06
Datteln	0,00	0,00	2,27	12,54	2,08	19,31	2,06	25,88	18,65	14,71	1,91	0,60	140,50
Delbrück	0,00	0,00	0,96	15,10	0,30	56,09	0,08	0,78	11,19	15,02	0,41	0,08	167,68
Dinslaken	0,58	0,00	9,23	18,63	1,64	27,98	2,13	22,29	11,44	5,18	0,76	0,14	198,03
Dormagen	0,00	0,00	3,92	23,29	2,36	18,64	3,27	21,54	14,88	9,63	2,36	0,11	165,97
Dorsten	0,00	0,00	3,37	9,42	0,75	18,34	2,05	16,73	37,30	9,17	2,74	0,13	114,34
Dortmund	0,99	0,05	15,40	20,26	3,00	30,00	1,67	6,16	10,14	11,59	0,40	0,35	206,49



	2	4	5	6	8	9	10	A	B	D	F	G	UHI Risk
Duisburg	0,59	0,05	22,50	15,83	1,01	27,45	4,91	7,15	13,09	4,88	0,28	2,26	218,86
Dülmen	0,00	0,00	1,71	11,85	1,08	21,23	1,76	15,00	29,10	16,83	1,43	0,02	116,94
Düsseldorf	1,60	1,00	31,62	8,67	1,80	21,81	2,78	9,95	15,30	4,03	0,37	1,07	240,01
Eitorf	0,00	0,00	0,11	4,05	0,16	14,78	0,16	26,54	47,51	6,65	0,04	0,02	94,22
Elsdorf	0,00	0,00	4,36	29,32	1,89	30,89	2,12	2,54	9,88	17,22	1,78	0,00	170,48
Ennepetal	0,00	0,00	1,15	7,28	0,68	23,09	0,45	1,64	55,23	10,15	0,33	0,00	79,39
Erftstadt	0,00	0,00	4,56	25,13	1,10	20,14	2,81	9,44	17,52	16,43	1,74	1,14	149,22
Erkrath	0,00	0,00	11,00	14,02	2,18	37,14	1,42	2,55	25,65	5,37	0,58	0,09	174,87
Erndtebrück	0,00	0,00	0,02	2,55	0,06	6,18	0,05	13,72	69,36	8,05	0,00	0,00	46,30
Eschweiler	0,00	0,00	4,53	12,75	1,48	26,48	3,99	0,32	31,96	17,92	0,22	0,35	119,01
Essen	0,75	0,61	31,06	10,82	0,67	30,84	1,08	3,28	17,49	2,74	0,08	0,57	238,96
Frechen	0,00	0,00	10,14	15,26	1,77	14,90	4,86	8,92	36,10	6,96	0,63	0,47	140,84
Fröndenberg/Ruhr	0,00	0,00	0,97	14,83	0,91	34,69	0,12	1,43	26,75	18,82	1,48	0,00	122,34
Gelsenkirchen	0,49	0,01	30,35	8,13	1,49	28,61	3,04	2,75	20,12	4,18	0,10	0,73	224,90
Gevelsberg	0,00	0,00	8,50	14,98	1,72	29,29	0,39	2,83	29,13	13,16	0,00	0,00	147,06
Gladbeck	0,06	0,00	22,80	13,95	0,76	33,13	1,85	3,37	20,41	3,43	0,07	0,17	213,08
Grevenbroich	0,00	0,00	4,84	19,47	0,78	22,29	1,79	2,78	32,32	13,36	2,29	0,10	126,50
Haan	0,00	0,00	10,00	19,17	2,04	35,32	0,94	4,45	18,23	9,37	0,50	0,00	181,51
Hagen	0,04	0,00	7,86	8,49	1,83	19,66	1,24	3,94	48,61	7,12	0,86	0,35	111,27
Haltern am See	0,00	0,00	1,49	4,28	0,08	8,75	1,21	38,31	37,02	5,35	2,62	0,89	110,77
Halver	0,00	0,00	0,00	3,77	0,21	18,21	0,00	1,86	55,54	19,91	0,31	0,21	53,75
Hamm	0,06	0,00	6,26	22,82	1,84	31,98	2,15	6,09	13,42	13,34	1,32	0,72	172,06
Hamminkeln	0,00	0,00	0,00	3,22	0,10	5,15	0,54	6,96	28,50	53,99	1,54	0,00	33,52
Hattingen	0,00	0,00	6,44	10,31	0,54	30,11	0,60	1,54	42,39	8,07	0,02	0,00	123,77
Havixbeck	0,00	0,00	0,74	12,07	1,12	24,59	0,27	16,58	16,86	24,74	3,02	0,00	121,88
Heiligenhaus	0,00	0,00	7,59	17,01	2,03	40,96	1,82	0,64	21,12	8,21	0,61	0,00	173,06
Hemer	0,00	0,00	0,55	8,91	0,43	13,57	0,19	2,47	59,72	13,39	0,76	0,00	60,09
Hennef (Sieg)	0,00	0,00	1,53	10,98	0,47	23,11	0,79	5,60	41,06	16,06	0,22	0,19	97,29
Herdecke	0,00	0,00	5,10	11,79	0,26	29,10	0,46	8,91	39,55	3,60	0,00	1,22	132,59
Herne	0,29	0,07	41,57	12,31	1,24	26,32	2,32	1,14	11,45	2,02	0,02	1,24	270,66
Herscheid	0,00	0,00	0,00	2,13	0,07	8,23	0,00	11,45	66,89	10,83	0,41	0,00	45,39
Herten	0,00	0,00	13,13	22,45	1,50	22,98	3,08	6,50	22,82	5,68	0,20	1,65	180,45
Herzogenrath	0,00	0,00	2,64	23,71	1,09	43,57	1,36	0,81	15,89	10,85	0,08	0,00	171,53
Hilchenbach	0,00	0,00	0,03	4,44	0,01	6,89	0,04	13,49	70,44	3,99	0,53	0,13	51,87
Hilden	0,00	0,00	17,41	19,39	3,81	18,58	1,88	20,73	15,58	2,33	0,16	0,15	212,53
Holzwickede	0,00	0,00	5,22	21,18	1,76	31,41	1,20	3,76	17,07	17,27	0,76	0,37	156,22
Hövelhof	0,00	0,00	0,39	5,50	0,27	19,32	0,13	19,55	42,99	11,57	0,23	0,04	95,98
Hünxe	0,00	0,00	0,00	2,72	0,04	12,81	1,21	36,42	31,57	13,17	1,74	0,30	106,24
Hürth	0,00	0,00	10,83	17,47	0,83	19,55	6,19	6,92	27,15	7,22	2,94	0,91	154,95
Iserlohn	0,18	0,00	2,83	11,01	0,83	20,60	0,58	4,11	48,26	10,45	1,06	0,09	95,83
Jüchen	0,00	0,00	0,40	24,22	1,26	44,57	1,60	0,00	7,46	20,26	0,22	0,00	165,05
Kaarst	0,00	0,00	7,72	31,86	0,96	26,61	2,40	0,54	14,75	14,57	0,25	0,33	174,97
Kamen	0,00	0,00	2,84	38,27	3,11	30,58	1,96	5,00	5,60	10,58	2,05	0,00	192,78

	2	4	5	6	8	9	10	A	B	D	F	G	UHI Risk
Kamp-Lintfort	0,00	0,00	1,54	11,14	0,14	26,68	2,00	11,64	31,20	14,00	1,48	0,17	118,10
Kerpen	0,00	0,00	3,93	16,34	1,90	19,06	2,74	11,26	32,05	11,01	1,68	0,03	128,69
Kierspe	0,00	0,00	0,00	4,52	0,27	12,03	0,00	0,44	67,87	14,62	0,11	0,15	39,24
Köln	4,90	0,13	26,43	8,63	2,93	15,84	5,24	10,87	12,91	8,59	1,75	1,79	225,48
Königswinter	0,00	0,00	2,61	13,63	0,56	21,39	1,59	23,45	28,43	7,66	0,59	0,07	139,70
Korschenbroich	0,00	0,00	2,34	19,69	0,62	37,17	1,68	2,58	18,42	16,78	0,14	0,58	148,93
Krefeld	1,52	0,04	16,38	17,15	1,98	34,54	2,98	2,19	12,26	10,79	0,04	0,12	207,28
Kreuztal	0,00	0,00	0,21	11,35	0,39	11,34	0,41	14,22	52,98	7,03	2,08	0,00	82,08
Kürten	0,00	0,00	0,00	5,49	0,13	26,77	0,24	0,96	51,19	13,68	0,25	1,29	75,41
Langenfeld (Rhld.)	0,07	0,00	15,95	19,90	4,55	25,75	2,74	6,28	15,71	8,19	0,59	0,29	199,91
Leichlingen (Rhld.)	0,00	0,00	4,01	15,90	0,84	30,52	0,44	2,31	38,56	7,42	0,00	0,00	130,12
Leverkusen	0,25	0,00	22,15	20,06	3,08	26,29	3,06	3,94	14,74	5,89	0,36	0,18	220,00
Lichtenau	0,00	0,00	0,02	2,35	0,00	4,77	0,03	45,27	40,93	5,73	0,88	0,02	102,42
Lohmar	0,00	0,00	0,21	12,18	0,54	22,19	1,02	7,68	41,54	14,38	0,28	0,00	97,15
Lüdenscheid	0,04	0,00	3,91	9,10	0,40	17,95	0,39	1,83	59,38	6,28	0,34	0,37	83,40
Lüdinghausen	0,00	0,00	1,39	7,27	0,71	19,42	0,97	10,31	28,47	28,65	2,61	0,20	89,48
Lünen	0,00	0,00	15,95	20,85	1,96	29,48	2,01	5,80	9,32	13,32	0,49	0,83	201,09
Marl	0,00	0,00	10,49	16,65	0,33	19,09	4,52	16,56	23,22	5,60	2,50	1,03	165,01
Meckenheim	0,00	0,00	2,50	22,53	2,21	16,55	0,91	33,87	11,47	9,43	0,46	0,07	173,10
Meerbusch	0,00	0,00	5,83	25,59	0,26	30,10	1,26	5,92	18,26	12,00	0,73	0,06	166,45
Meinerzhagen	0,00	0,00	0,08	3,50	0,03	9,27	0,13	11,08	63,54	12,06	0,10	0,22	50,71
Menden (Sauerland)	0,00	0,00	1,31	14,63	1,19	17,26	0,24	13,33	44,18	7,64	0,23	0,00	107,95
Mettmann	0,00	0,00	7,13	27,32	1,69	34,93	0,83	0,00	13,44	12,87	1,79	0,00	178,81
Moers	0,46	0,00	9,41	28,67	1,41	39,83	1,20	2,69	5,52	10,41	0,00	0,40	209,46
Mönchengladbach	1,16	0,02	16,28	11,58	2,51	39,25	2,26	4,25	14,17	8,49	0,04	0,00	206,48
Monheim am Rhein	0,00	0,00	22,57	27,05	3,29	11,77	4,42	7,97	14,89	6,26	0,99	0,78	215,21
Much	0,00	0,00	0,00	4,98	0,11	29,37	0,00	1,95	43,91	19,69	0,00	0,00	81,43
Mülheim an der Ruhr	0,46	0,13	21,26	14,77	0,83	28,40	0,89	8,77	20,52	3,64	0,15	0,19	209,61
Münster	0,66	0,00	10,82	14,71	1,70	23,46	1,52	8,08	18,61	19,20	1,13	0,11	157,73
Nachrodt-Wiblingwerde	0,00	0,00	0,00	3,99	0,02	11,11	0,13	0,36	69,27	14,80	0,33	0,00	35,29
Netphen	0,00	0,00	0,25	3,13	0,06	5,23	0,05	16,61	67,93	6,52	0,04	0,18	52,01
Neuenrade	0,00	0,00	0,00	5,26	0,07	7,03	0,02	4,29	61,13	21,61	0,59	0,00	36,67
Neukirchen-Vluyn	0,00	0,00	0,47	18,52	0,23	39,77	1,20	4,82	11,66	23,29	0,00	0,03	146,67
Neunkirchen	0,00	0,00	0,01	8,94	0,42	6,82	0,14	27,30	54,79	1,59	0,00	0,00	89,91
Neunkirchen-Seelscheid	0,00	0,00	0,12	13,75	0,04	24,19	0,00	2,45	43,61	14,52	0,96	0,36	92,20
Neuss	0,19	0,00	23,85	17,00	0,65	27,03	4,56	2,34	15,51	6,77	1,19	0,90	213,57
Niederkassel	0,00	0,00	1,29	46,69	6,81	14,08	6,77	0,82	0,94	17,06	5,31	0,22	179,26
Nordkirchen	0,00	0,00	0,00	11,42	0,59	19,59	0,74	16,94	13,70	35,72	1,31	0,00	106,01
Nottuln	0,00	0,00	0,16	14,12	1,87	28,15	1,99	10,03	25,72	15,08	2,88	0,00	124,51
Oberhausen	2,28	0,11	27,70	17,55	0,89	24,55	3,20	9,89	8,67	3,47	0,10	1,59	248,56
Odenthal	0,00	0,00	0,18	6,88	0,00	22,09	0,00	1,13	58,28	10,58	0,33	0,52	68,67
Oer-Erkenschwick	0,00	0,00	4,30	9,08	0,45	11,18	1,61	48,33	20,84	3,41	0,80	0,00	159,97

	2	4	5	6	8	9	10	A	B	D	F	G	UHI Risk
Olfen	0,00	0,00	0,14	10,84	1,05	17,78	1,63	20,52	20,51	25,38	1,41	0,74	110,57
Overath	0,00	0,00	0,31	9,08	0,44	24,95	0,71	4,10	48,54	11,69	0,14	0,03	88,81
Paderborn	0,16	0,00	7,93	22,23	1,10	23,32	0,81	10,59	22,76	9,76	1,07	0,28	163,21
Pulheim	0,00	0,00	14,31	29,23	2,07	18,71	3,06	4,13	9,36	15,56	2,59	0,99	189,08
Ratingen	0,00	0,00	5,61	12,40	0,70	24,82	1,82	6,18	40,98	7,16	0,14	0,19	124,68
Recklinghausen	0,56	0,00	22,29	20,80	2,11	28,05	3,00	1,13	15,97	5,48	0,37	0,26	219,58
Remscheid	0,00	0,00	9,70	12,98	3,00	31,73	0,54	5,65	29,25	6,85	0,18	0,12	161,76
Rheinbach	0,00	0,00	1,35	12,01	1,47	12,37	1,03	40,88	18,25	12,33	0,30	0,00	145,26
Rheinberg	0,00	0,00	0,51	22,27	0,26	46,61	1,95	0,60	6,92	20,30	0,20	0,39	164,26
Roetgen	0,00	0,00	0,00	2,02	0,02	12,70	0,26	8,47	63,35	2,10	9,89	1,19	49,70
Rommerskirchen	0,00	0,00	0,49	20,27	1,10	31,59	1,90	0,58	10,97	29,44	3,66	0,00	128,07
Rosendahl	0,00	0,00	0,24	5,10	0,35	26,99	0,81	11,28	36,42	15,95	2,85	0,00	97,04
Rösrath	0,00	0,00	0,67	15,58	0,28	19,51	0,68	20,73	38,23	4,17	0,14	0,00	124,87
Ruppichteroth	0,00	0,00	0,00	2,75	0,00	15,38	0,02	25,45	47,00	9,30	0,10	0,00	89,28
Salzkotten	0,00	0,00	0,15	16,35	0,33	21,75	0,20	25,37	19,74	14,83	1,18	0,11	137,75
Sankt Augustin	0,27	0,00	11,77	32,28	2,86	22,35	3,52	2,69	13,04	9,72	1,43	0,07	195,46
Schalksmühle	0,00	0,00	0,00	4,01	0,05	20,52	0,18	0,00	60,93	14,21	0,02	0,10	55,77
Schermbeck	0,00	0,00	0,05	2,86	0,06	13,24	2,13	22,98	46,16	10,84	1,24	0,44	83,65
Schwelm	0,00	0,00	8,10	15,21	5,06	34,24	0,11	1,66	24,74	10,87	0,00	0,00	163,58
Schwerte	0,00	0,00	5,61	14,33	1,85	22,77	1,05	9,22	33,94	10,27	0,96	0,00	132,51
Selm	0,00	0,00	0,78	16,16	0,97	31,53	0,34	17,16	8,56	24,24	0,25	0,00	148,13
Senden	0,00	0,00	0,21	10,07	0,44	17,86	1,64	21,63	9,44	35,72	2,87	0,12	109,65
Siegburg	2,06	0,00	11,92	19,69	2,49	21,01	2,94	8,47	24,10	6,16	0,84	0,32	180,42
Siegen	0,03	0,00	4,88	15,32	0,68	17,07	0,76	15,38	42,63	3,13	0,00	0,12	127,36
Simmerath	0,00	0,00	0,05	1,72	0,08	13,87	0,27	9,86	63,37	9,19	0,65	0,94	54,62
Solingen	0,03	0,01	14,45	14,37	1,12	28,32	0,25	3,05	31,97	6,34	0,08	0,02	166,73
Sonsbeck	0,00	0,00	0,24	5,24	0,29	26,72	0,18	11,24	36,05	19,58	0,46	0,00	95,60
Sprockhövel	0,00	0,00	0,99	11,41	1,18	35,84	0,31	1,11	35,19	13,90	0,08	0,00	117,20
Stolberg (Rhld.)	0,00	0,00	0,98	5,89	0,18	17,96	0,94	2,26	59,09	8,31	4,03	0,36	64,43
Swisttal	0,00	0,00	0,21	15,88	0,66	14,75	1,67	31,17	18,01	16,34	1,31	0,00	135,41
Troisdorf	0,11	0,00	7,53	17,50	3,07	10,99	3,30	12,65	27,57	15,04	2,09	0,15	135,57
Unna	0,00	0,00	8,33	24,71	2,47	32,83	2,31	1,61	12,80	12,49	2,45	0,00	180,23
Velbert	0,00	0,00	7,41	13,19	1,90	32,74	1,40	0,67	34,29	8,17	0,14	0,09	143,84
Voerde (Nieder- rhein)	0,00	0,00	1,07	18,54	0,58	51,92	2,18	6,12	10,85	8,68	0,00	0,05	181,18
Wachtberg	0,00	0,00	0,43	17,53	0,18	22,85	1,17	20,04	24,03	13,47	0,30	0,00	135,14
Waltrop	0,00	0,00	8,80	15,72	0,91	27,81	1,66	8,10	8,85	27,04	1,06	0,04	156,48
Werdohl	0,00	0,00	2,32	5,66	0,59	18,24	0,55	2,61	64,18	5,44	0,40	0,00	71,27
Wermelskirchen	0,00	0,00	1,41	7,91	0,57	21,73	0,21	0,09	55,68	11,54	0,53	0,33	75,32
Werne	0,00	0,00	3,46	15,09	1,89	20,88	0,96	21,47	11,27	23,55	1,44	0,00	144,47
Wesel	0,19	0,10	3,88	8,73	0,56	18,57	2,30	13,06	21,78	27,74	2,90	0,20	109,48
Wesseling	0,00	0,00	8,67	39,01	4,79	25,30	12,20	0,00	0,81	5,68	2,42	1,14	217,30
Wetter (Ruhr)	0,00	0,00	2,09	16,66	0,92	30,72	1,11	0,02	38,52	9,21	0,51	0,23	121,39
Wilnsdorf	0,00	0,00	0,01	8,83	0,13	11,66	0,14	10,99	60,13	7,97	0,08	0,06	68,68

	2	4	5	6	8	9	10	A	B	D	F	G	UHI Risk
Windeck	0,00	0,00	0,00	2,01	0,00	11,09	0,00	22,10	59,85	4,95	0,00	0,00	71,54
Witten	0,00	0,00	7,09	16,11	2,73	33,96	1,29	6,20	27,12	5,07	0,23	0,21	164,88
Wülfrath	0,00	0,00	2,78	14,85	0,87	31,80	2,32	0,98	36,05	8,95	0,87	0,53	125,78
Wuppertal	0,85	0,00	16,04	10,54	2,21	29,61	0,85	5,69	29,14	4,70	0,18	0,19	179,75
Würselen	0,00	0,00	2,96	22,15	1,37	45,30	2,39	0,00	12,20	13,61	0,02	0,00	173,74
Xanten	0,00	0,00	0,00	11,58	0,18	29,53	0,03	14,64	12,79	30,32	0,30	0,63	122,00

## X Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich meine Bachelorarbeit mit dem Titel „Analyse und Vergleich der Oberflächenstruktur von Gemeinden in Nordrhein-Westfalen anhand des Local Climate Zone Konzeptes“ selbständig verfasst und die benutzten Hilfsmittel und Quellen sowie gegebenenfalls die zu Hilfeleistungen herangezogenen Institutionen vollständig angegeben habe. Alle Stellen der Arbeit, die anderen Quellen dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, sind kenntlich gemacht. Mit der Übermittlung meiner Arbeit auch an externe Dienste zur Plagiatsprüfung erkläre ich mich einverstanden.

\_\_\_\_\_  
Ort, Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift

Name: Johannes Mast